

Г. А. МАТВЕЕВ и В. И. ХОМИЧ

КАТУШКИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Вып. 650

Г. А. МАТВЕЕВ и В. И. ХОМИЧ

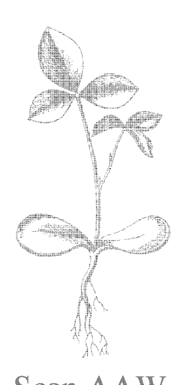
КАТУШКИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Издание 2-е, дополненное



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967



6Ф2.13
М 33
УДК 621.318.136

Матвеев Г. А. и Хомич В. И.

М 33 Катушки с ферритовыми сердечниками. Изд. 2-е, доп. М., «Энергия», 1967.

64 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 650). 70 000 экз. 16 к.

Рассмотрены основные свойства ферритов и даны рекомендации по их применению в катушках индуктивности. Описаны типовые конструкции катушек с ферритовыми сердечниками, даются примеры использования катушек индуктивности и магнитных материалов, приводятся справочные данные по современным ферритам и сердечникам из них. Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
335-67

6Ф2.13

Матвеев Георгий Александрович и *Хомич Вадим Иванович*

Катушки с ферритовыми сердечниками

* * *

Редактор *Р. М. Малинин* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*
Корректор *Е. В. Кузнецова*

Сдано в набор 21/I 1967 г. Подписано к печати 8/VI 1967 г. Т-06965
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 3,36 Уч.-изд. л. 3,85
Тираж 70 000 экз. Цена 16 коп. Заказ № 118

Издательство «Энергия», Москва, Ж-114. Шлюзовая наб. 10.

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первый патент на изготовление неметаллических ферромагнетиков-ферритов был получен в начале нашего столетия, однако лишь с 1946 г. началось широкое внедрение этих материалов во все отрасли электроники и прежде всего в радиотехнику. Так как объемное электрическое сопротивление ферритов в миллиарды раз больше сопротивления металлов, потери на вихревые токи в ферритах значительно меньше, чем в металлических ферромагнетиках. Благодаря этому за сравнительно короткий срок ферриты почти полностью вытеснили металлические ферромагнетики из радиотехники. Они стали основой феррит-транзисторных ячеек вычислительных машин, завоевали прочные позиции в технике СВЧ.

Успешное конструирование катушек индуктивности с ферритовыми сердечниками возможно при условии правильного выбора материала сердечника. Для этого необходимо знать его магнитные, электрические и механические свойства, рассчитать число витков катушки, их расположение, марку провода, а также стабильность параметров во времени и при изменении температуры и особенности работы катушки в различных режимах. При подготовке второго издания этой брошюры авторами учтены критические замечания и пожелания читателей по первому изданию: расширен раздел, касающийся свойств ферритов, более подробно освещены вопросы их стабильности, дополнены разделы, касающиеся магнитной перестройки катушек индуктивности.

В этом издании отражен прогресс в развитии магнитных материалов за время, истекшее после выхода первого издания, освещены вопросы измерения параметров катушек индуктивности, приведены справочные данные по выпускаемым нашей промышленностью ферритам и изделиям из них.

АВТОРЫ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитное поле в пространстве характеризуется достаточно полно двумя величинами: *напряженностью* H и *индукцией* B. Напряженность магнитного поля можно представить как значение «магнитного заряда», отнесенное к единице площади. Наиболее просто величина H определяется в кольцевой (тороидальной) катушке индуктивности, по которой протекает постоянный ток. Магнитное поле внутри такой катушки практически однородно и напряженность его в системе СИ выражается формулой

$$H = \frac{wI}{2\pi R_{\text{ср}}} [a/м], \quad (1)$$

где I — ток, *a*;
w — число витков;
$R_{\text{ср}}$ — средний радиус тороидальной катушки, *м*.

В системе CGSμ напряженность поля выражается в эрстедах (*э*). При этом 80 *а/м* соответствует 1 *э*.

Индукция магнитного поля B характеризует силу, с которой поле воздействует на единичный магнитный заряд. Так же, как и напряженность, она отнесена к единице площади. Индукция магнитного поля связана с напряженностью поля *магнитной проницаемостью* μ — коэффициентом, учитывающим влияние среды. Чем больше магнитная проницаемость среды, тем больше индукция, а следовательно, и общий магнитный поток, пронизывающий данную площадь.

В системе СИ индукция выражается в теслах (*тл*), а в системе CGSμ — в гауссах (*гс*), причем 1 *тл* = 10^4 *гс*.

Магнитная проницаемость большинства материалов практически не отличается от магнитной проницаемости вакуума (μ_0), равной единице в системе СИ. Вещества с магнитной проницаемостью, значительно большей, чем магнитная проницаемость в вакууме, называют *ферромагнитными*. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ферриты.

Проницаемость ферромагнитных веществ по отношению к проницаемости вакуума носит название относительной проницаемости, т. е.

$$\mu_{\text{абс}} = \mu_0 \, \mu_{\text{отн}}. \quad (2)$$

В дальнейшем, говоря о магнитной проницаемости, мы будем подразумевать всегда относительную магнитную проницаемость.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от величины намагничивающего поля.

Одной из важнейших характеристик всякого магнитного материала, в том числе и феррита, является начальная магнитная проницаемость $\mu_н$ — проницаемость при малых напряженностях поля (менее 8 *а/м*).

При перемагничивании ферромагнетика в переменном поле одним и тем же значениям напряженности поля (у одного и того же

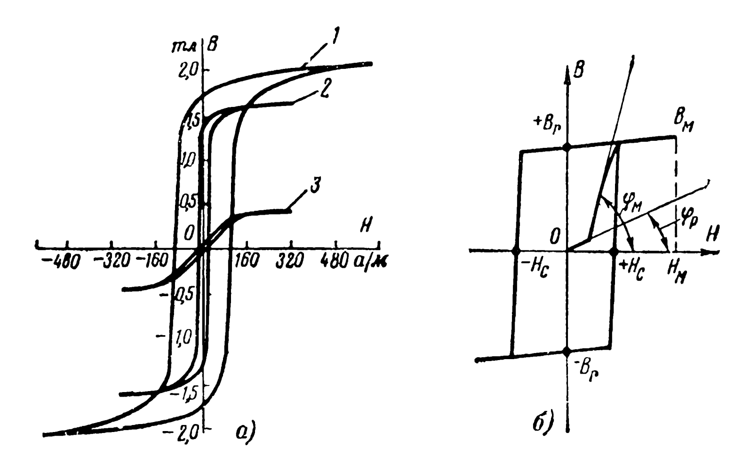


Рис. 1. Кривые гистерезиса.

а — кривые гистерезиса магнитомягкой стали (*1*), пермаллоя (*2*) и феррита марки 600НН (*3*); *б* — характерные точки кривой гистиреэиса.

материала) соответствуют разные значения индукции в зависимости от того, увеличивается или уменьшается напряженность поля. Явление это называется гистерезисом. Кривая, по которой изменяется *B* при увеличении *H*, совместно с кривой, по которой изменяется *B* при уменьшении *H*, образуют петлю гистерезиса (рис. 1, *а*). Площадь ее пропорциональна потерям магнитной энергии в материале (магнитным потерям).

Вид петли гистерезиса позволяет определить целесообразность применения магнитного материала в той или иной области. Рисунок 1, *б* показывает, как по петле гистерезиса найти важнейшие параметры магнитных материалов. Начальная магнитная проницаемость $\mu_н$ и максимальная магнитная проницаемость $\mu_м$ определяются как тангенс углов φ_0 и $\varphi_м$ наклона касательных к кривой намагничивания. Здесь же показаны остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_c и индукция вершины петли $B_м$.

Современные магнитные материалы делятся на три группы: металлические (железо и его сплавы), порошкообразные (магнитодиэлектрики) и неметаллические сплавы (ферриты).

Металлические магнитные материалы применяют на сравнительно низких (звуковых) частотах. На более высоких частотах потери[1] в металлических сердечниках резко возрастают, а магнитная проницаемость падает. Наиболее «высокочастотные» металлические ферромагнетики — пермаллои (сплавы никеля с железом) применяют в виде лент толщиной до 0,01 *мм* на частотах до десятков килогерц. Отдельные марки металлических ферромагнетиков на низких частотах обладают магнитной проницаемостью до 25 000.

Магнитодиэлектрики (альсифер, карбонильное железо и др.) представляют собой ферромагнетики, изготовленные путем смешивания ферромагнитных порошков с диэлектриками. Каждая ферромагнитная частичка окружена слоем диэлектрика, отделяющим ее от соседних частиц. Благодаря такому строению магнитодиэлектрики имеют большое электрическое сопротивление, малые потери и применяются в диапазоне радиочастот. В качестве магнитных материалов для магнитодиэлектриков используют карбонильное железо, пермаллои, альсиферы (железо-алюминий-кремниевые сплавы), а в последнее время и ферриты. Связующими диэлектриками служат бакелитовые смолы, полистирол и стеклоэмали. Особенно широкое распространение получили сердечники из альсифера на стеклоэмалевой связке. Они имеют несколько меньшую добротность по сравнению с карбонильными, но зато обладают более высокой стабильностью во времени и при изменениях температуры. Альсифер имеет отрицательный относительный температурный коэффициент проницаемости, что позволяет использовать его для компенсации изменения индуктивности катушки при повышении температуры[2].

Простыми ферритами называют двойные окислы железа и двухвалентного металла. В технике применяют обычно твердые растворы двух или нескольких простых ферритов.

СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ

Химический состав простого феррита описывается формулой

$$MeOFe_2O_3.$$

Двухвалентным металлом, который обозначен в этой формуле символом Ме, может быть марганец, кобальт, никель, цинк, медь, магний, кадмий, литий или железо. Большинство ферритов имеет

---

[1] Величина магнитных потерь в сердечнике оценивается тангенсом угла потерь, определяемым как частное от деления сопротивления потерь эталонной катушки с данным сердечником к ее реактивному сопротивлению. Величину, обратную тангенсу потерь, называют добротностью.

[2] Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости определяют для тороидального сердечника по формуле

$$\alpha_\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu_н^2\,\Delta t}, \qquad (3)$$

где $\Delta\mu$ — приращение магнитной проницаемости;
Δt — вызвавшее его изменение температуры;
$\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость материала.

Параметры никель-

Параметр	Марки		
	2000НН	1000НН	600НН
Начальная магнитная проницаемость	$2\,000^{+400}_{-200}$	1 000	600^{+200}_{-100}
Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости в интервале температур от 20 до 70° С $\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$	3—9	5—15	6—15
Граничная частота при $\mathrm{tg}\delta \leqslant 0,1$, *Мгц*	0,02	0,4	1,2
Граничная частота при $\mathrm{tg}\,\delta \leqslant 0,02$, *Мгц*	—	—	0,2
Магнитная индукция B при $H_м = 800$ *а/м*, *тл*	0,25	0,32	0,31
Максимальная магнитная проницаемость $\mu_м$	7 000	3 000	1 600
Напряженность магнитного поля H при $\mu_м$, *а/м*	12	32	56
Остаточная магнитная индукция B_r (не более), *тл*	0,12	0,15	0,14
Коэрцитивная сила H_c (не более), *а/м*	8	20	32
Относительный коэффициент потерь на гистерезис на частоте 0,1 *Мгц* $\cdot 10^{-6}$	1,1	1,3	2,0
Точка Кюри (не ниже), °С	70	110	110
Изменение начальной магнитной проницаемости за 1 год (не более) %	±2	±2	±2

Таблица 1

цинковых ферритов

ферритов						
400НН	200НН	150ВЧ	50ВЧ2	30ВЧ2	20ВЧ	10ВЧ1
400^{+100}_{-50}	200^{+50}_{-70}	150	50^{+10}_{-5}	30	20^{+8}_{-2}	10
5—15	4—10	±4,0	От —1,0 до +2,0	±35	±5	+120
2,0	3,0	25	70	200	100	250
0,7	1,0	15	35	100	55	200
0,23	0,17	0,35	0,31	0,29	0,105	0,135
800	300	—	170	120	50	40
80,0	160	—	800	1 200	1 600	3 680
0,12	0,1	0,17	0,2	0,16	0,045	0,08
0,64	12,0	240	448	720	800	1 600
0,8	12,0	8	5	0,3	2	—
100	100	400	450	450	450	450
±2	±2	±1	±0,5	±0,5	±0,5	—

Параметры марганец

Параметр	Марки		
	6000НМ	4000НМ	3000НМ
Начальная магнитная проницаемость $\mu_н$	6 000	4000^{+800}_{-500}	$3\,000^{\pm 500}$
Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости в интервале температур от 20 до 70° С $\cdot 10^{-6}$ *град* $^{-1}$	0,2—1,5	0,5—1,5	1,0—2,0
Граничная частота при tgδ = =0,1, *Мгц*	0,005	0,1	0,2
Граничная частота при tgδ = =0,02, *Мгц*	—	0,005	0,015
Магнитная индукция B при $H_м$ =800 *а/м*, *тл*	0,35	0,36	0,38
Максимальная магнитная проницаемость $\mu_м$	10 000	7 000	3 500
Напряженность магнитного поля H при $\mu_м$, *а/м*	12	16	20
Остаточная магнитная индукция B_r (не более), *тл*	0,11	0,13	0,15
Коэрцитивная сила H_c (не более), *а/м*	8	8	12
Относительный коэффициент потерь на гистерезис на частоте 0,1 *Мгц* $\cdot 10^{-6}$	0,04	0,07	0,13
Точка Кюри (не ниже), °С	110	140	140
Изменение начальной магнитной проницаемости за 1 год, %	—	±2	±5

Таблица 2

-цинковых ферритов

ферритов				
2000НМ	1500НМ	1000НМ	700НМ	1500НМ2
$2\,000^{+500}_{-300}$	$1\,500^{+200}_{-300}$	1 000±200	700±200	1 500
От —2 до +4,5	От —1,1 до +7,0	От —0,5 до +8,5	От —0,2 до 0,7	± 0,6
0,45	0,6	1,0	5,0	0,8
0,08	0,15	0,5	3,0	0,6
0,39	0,35	0,35	0,39	0,3
3 500	—	1 800	2 000	1 800
20	—	40	128	—
0,14	—	0,11	0,05	—
16	20	28	24	20
0,17	0,23	0,37	0,04	—
200	200	200	240	180
±5	±5	±5	±3	—

кристаллическую структуру, близкую к кубической структуре минерала шпинели. В последнее время стали применять также ферриты с гексагональной решеткой — ферроксплаиы.

Технология изготовления ферритовых сердечников весьма сложна и практически исключает изготовление их радиолюбителями. Исходная смесь — шихта представляет собой тщательно перемешанный порошок мельчайшего помола, в который для облегчения прессования и связки частиц вводятся парафин, камфара или вода. Требуемая конфигурация сердечнику придается в специальных прессформах

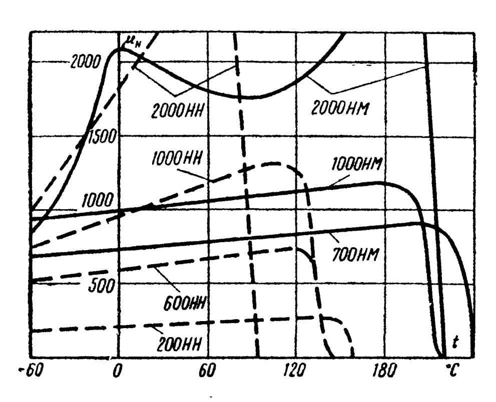


Рис. 2. Зависимость от температуры начальной магнитной проницаемости марганец-цинковых (сплошные линии) и никель-цинковых (штриховые линии) ферритов.

при давлениях до 6 *т/см²*. После этого сердечники спекают при высоких температурах (800—1 400° С) — происходит формирование окончательного химического состава и структуры ферритов.

Средняя плотность ферритов 4,8 *г/см³* Они тверды, хрупки и напоминают керамику.

Удельная теплоемкость ферритов составляет 0,17 *кал/г·град*, теплопроводность 0,01 *кал/ом·сек·град*, коэффициент линейнего расширения — около 10^{-5} на 1° С.

По своим свойствам, а следовательно, и по области применения, ферриты делятся на 4 группы: магнитно-мягкие ферриты, ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, магнитострикционные ферриты и ферриты бария. Последние используют для изготовления постоянных магнитов.

Магнитно-мягкие ферриты (табл. 1 и 2) характеризуются малой коэрцитивной силой и относительной пологой кривой намагничивания. Они подразделяются в свою очередь на две большие подгруппы: никель-цинковые (раствор никелевого феррита с цинковым) и марганец-цинковые (раствор марганцевого феррита с цинковым). Ферриты этих подгрупп различаются температурными свойствами.

На рис. 2 показана зависимость начальной магнитной проницаемости от температуры некоторых марганец-цинковых и никель-цинко-

вых ферритов. Как видно из этого графика, точка Кюри[1] у марганец-цинковых ферритов выше, чем у никель-цинковых ферритов с той же проницаемостью, а кривые температурной зависимости марганцевых ферритов более пологие. Поэтому относительные коэффициенты начальной магнитной проницаемости марганец-цинковых ферритов меньше, чем никель-цинковых.

Температурный коэффициент ферритов может быть как положительным, так и отрицательным, причем значение температурого коэффициента материала может изменяться при переходе от одного температурного интервала к другому.

Как показывают последние исследования К. А. Пискарева, никель-цинковые ферриты обладают меньшей дезаккомодацией по сравнению с марганец-цинковыми. Дезаккомодацией называют изменение магнитной проницаемости без каких-либо внешних воздействий. Обычно причина, вызвавшая это явление, существовала раньше того времени, когда наблюдалась дезаккомодация. Причиной, вызывающей изменение магнитных свойств материала, может быть сильное намагничивание, высокая температура и механические напряжения.

Процесс возвращения к стабильному состоянию составляет суть явления дезаккомодации.

С явлением дезаккомодации тесно связано старение ферритов. Катушки с сердечниками марганец-цинковых ферритов вследствие старения за год изменяют величину индуктивности до 2—5%, а отдельные образцы даже до 10%. Никель-цинковые ферриты меньше подвержены старению, однако их начальная проницаемость может необратимо измениться вследствие кратковременной деформации, вызванной, например, ударами и сильной вибрацией. Это явление носит название шок-эффекта. Поэтому необходимо с большой осторожностью подходить к выбору способа механической обработки ферритов. Наиболее «безопасным» способом обработки ферритового изделия с точки зрения возможного нежелательного снижения магнитной проницаемости является шлифовка на металлическом круге с применением абразивных порошков мелкой структуры. Механические усилия при шлифовке должны быть минимальны: давление при обработке ферритов шлифовкой не должно превышать 0,5—1 *кг/см*^{2}. Ферритовые изделия можно обрабатывать также с помощью ультразвука. После чрезмерных ударных нагрузок возможно лишь частичное восстановление добротности сердечника путем циклического его нагрева до температуры на 20—30% ниже точки Кюри.

Ферритовые сердечники хорошо склеиваются. Для соединения отдельных частей сложного сердечника, например броневого, а также для крепления сердечников на шасси можно применять клеи БФ-2 и БФ-4. Наиболее прочное склеивание достигается эпоксидной смолой, хотя при этом несколько ухудшается добротность сердечника. При склеивании разбитых сердечников магнитные свойства их изменяются незначительно (при условии малости магнитного зазора).

Марки ферритов состоят из нескольких букв и цифр: например 700НМ, 30ВЧ2. Цифры перед буквами соответствуют номинальному значению начальной магнитной проницаемости; первая буква или первые две буквы указывают обычно рабочий диапазон частот фер-

---

[1] Точкой Кюри называется температура, за которой ферромагнетики теряют магнитные свойства.

рита (Н — низкочастотный, ВЧ — высокочастотный[1]), вторая буква — Н в марке низкочастотного феррита обозначает никель-цинковый феррит, а М — марганец-цинковый; буквы И и С обозначают, что феррит предназначен для работы соответственно в импульсных режимах или в сильных полях.

Цифры после букв указывают на особые свойства ферритов.

Начальная магнитная проницаемость ферритов в зависимости от их химического состава и технологии изготовления находится в пределах от единиц до 7 000. Основным преимуществом ферритов по

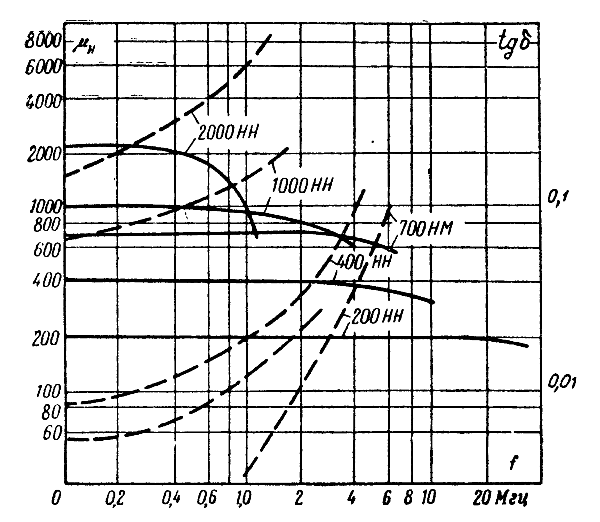


Рис. 3. Зависимость начальной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (штриховые линии) от частоты.

сравнению с металлическими магнитными материалами являются малые потери на высоких частотах. Однако с ростом частоты потери увеличиваются, а магнитная проницаемость ферритов уменьшается.

В справочниках приводят значения граничных частот применения феррита. Граничной считают такую частоту, при которой тангенс угла потерь равен 0,1 (или 0,02). Так как магнитные потери зависят от частоты и индукции, а также от физических свойств магнитного материала, то понятие о граничной частоте весьма условно, т. е. имеет смысл лишь для конкретного типа катушек.

Граничная частота тороидальных сердечников со сплошной намоткой определяется экспериментально. Для сердечников других форм, в частности цилиндрических, граничные частоты повышаются. Так, если для тороидального сердечника (см. табл. 1 и 2) граничная час-

[1] В данном случае к низким частотам условно относят частоты ниже 2 *Мгц*.

тота равна 15—20 *Мгц*, то для цилиндрического сердечника она составляет 40—45 *Мгц*. Сердечники из феррита с начальной магнитной проницаемостью $\mu_н=600$ имеют следующие граничные частоты: тороидальные — около 1,2 *Мгц* и цилиндрические — 2,8—3 *Мгц*.

Используя изменения свойств ферритов за пределами граничных частот, можно получить принципиально новые свойства элементов с ферритовыми сердечниками. На рис. 3 приведены кривые, показывающие изменение магнитной проницаемости и магнитных потерь ферритов от частоты. Заметное снижение магнитной проницаемости $\mu_н$ ферритов различных марок начинается с частот, которые обычно выше граничных. Началу падающего участка $\mu_н$ предшествует резкое увеличение магнитных потерь ($\operatorname{tg}\delta$).

Относительная диэлектрическая проницаемость ферритов на низких частотах (до 10 *кгц*) достигает весьма высоких значений (сотни и тысячи). Однако уже при частотах порядка 100 *кгц* и выше значения диэлектрической проницаемости уменьшаются до 50—100 и, медленно снижаясь, доходят до 10—15. В диапазоне радиочастот диэлектрическая проницаемость ферритов еще достаточно велика (от 20 до 40), хотя и обнаруживает тенденцию к дальнейшему понижению. Это обстоятельство следует учитывать при расчете межвитковой емкости катушек индуктивности.

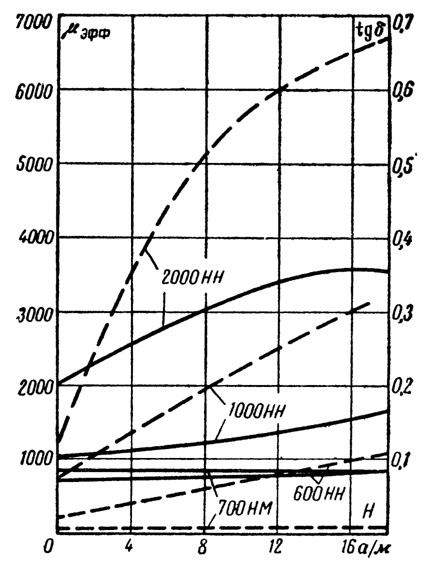


Рис. 4. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса потерь (штриховые линии) от амплитуды переменного синусоидального магнитного поля.

Сердечники из магнитномягких ферритов применяют в катушках индуктивности, дросселях, трансформаторах, в магнитных усилителях и магнитных антеннах. Свойства сердечников играют определяющую роль при расчете и эксплуатации катушек индуктивности.

Ферритовые сердечники используют преимущественно в слабых полях, где сохраняется прямая пропорциональность *B* и *H* и где начальная магнитная проницаемость может считаться постоянной. При увеличении амплитуды намагничивающего переменного поля *H* закон пропорциональности между индукцией и напряженностью поля нарушается. На рис. 4 показана зависимость эффективной проницаемости и тангенса потерь и амплитуды переменного магнитного поля.

В ряде случаев, когда форма кривой изменения *B*, *H* играет второстепенную роль, например когда ферриты используют для сердеч-

Таблица 3

Параметры ферритов, применяемых в импульсных режимах

Марка феррита	Импульсная магнитная проницаемость $\mu_{имп}$	Условия, в которых гарантируется $\mu_{имп}$			Относительное изменение импульсной магнитной проницаемости** $\Delta\mu$, не более, %
		Напряженность оптимального намагничивающего поля в импульсе, $H_{и.о}$*, *а/м*	Длительность импульса $\tau_и$, *мксек*	Частота следования $f_и$, *кгц*	
1500НМ1	1 700±300	80	3,0	5,0	±20
100НМ3	1 400±200	80	3,0	5,0	±15
НМИ1	1 100±150	80	0,5	0,5	±15
НМИ2	600±50	160	6,0	0,5	±12
ННИ1	300±10	80	1,0	5,0	+30
	295±10	160			
	280±10	240			
ННИ2	360±75	80	0,5	0,5	—45 или ±30

* Напряженность поля, при которой имеет место наилучшая стабильность магнитной проницаемости.

** В интервале температур от —60 до 85° С, за исключением феррита марки НМИ2, для которого интервал температур — от —50 до +60° С, и феррита марки ННИ2, для которого в интервале температур от —40 до +20° С $\Delta\mu$= =—45% и в интервале температур от +20 до +85° С $\Delta\mu=\pm30\%$.

ников импульсных трансформаторов, магнитная проницаемость $\mu_{имп}$ оценивается как отношение B/H в течение всего импульса. В табл. 3 приведены данные ферритов, применяемых для работы в импульсных режимах, и указаны условия, при которых эти данные получены.

Кривые на рис. 5 показывают, как изменяется импульсная магнитная проницаемость некоторых ферритов, предназначенных для работы в импульсных режимах, от импульсного значения напряженности намагничивающего поля.

Применение ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) в элементах памяти логических схем основано на наличии у них двух устойчивых состояний: положительной и отрицательной остаточной индукции. Основным параметром таких ферритов, опре-

делящим устойчивость элемента памяти, является *коэффициент прямоугольности* петли гистерезиса. Он определяется как отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции $B_м$, т. е.

$$k_{пр} = \frac{B_r}{B_м}. \qquad (4)$$

В целях максимальной экономичности работы логических схем, в которых число элементов достигает десятков тысяч, желательно, чтобы коэффициент прямоугольности максимально приближался к единице. Из числа ферритов с ППГ основное промышленное значение имеют марганец-магниевые, коэффициент прямоугольности которых равен 0,85—0,95 (табл. 4).

Элементы, построенные на сердечниках из ферритов с ППГ, малогабаритны, экономичны и надежны. Срок службы их практически не ограничен. Выбор марки феррита производится с учетом требуемого быстродействия, величины сигнала и мощности переключения.

Наименование ферритовых сердечников ППГ отражает их назначение (ВТ — вычислительная техника), при этом цифры перед буквами показывают минимальную величину коэрцитивной силы в эрстедах.

Как видно из рис. 1, коэрцитивная сила равна напряженности магнитного поля, необходимой для полного размагничивания сердечника ($B=0$).

Выше мы говорили о влиянии механических напряжений на ферриты, как об одном из дестабилизирующих факторов. Исследования показали, что изменение величины прони-

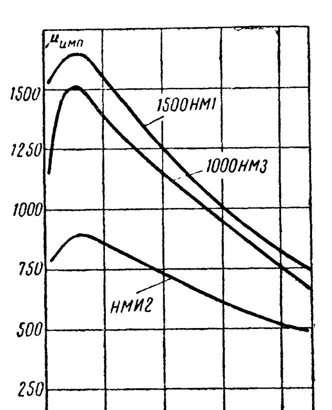


Рис. 5 Зависимость импульсной проницаемости от напряженности магнитного поля в импульсе. Для ферритов марок 1500НМ1 и 1000НМ3 $\tau_и=3$ *мксек*, $f_и=0,5$ *кгц*.

Таблица 4

Основные параметры ферритов с ППГ

Параметр	Марки ферритов						
	0,16ВТ	0,3ВТ	0,7ВТ	0,9ВТ	1,5ВТ	2ВТ	4ВТ
Коэрцитивная сила, *а/м*	12,8	24	56	72	120	160	320
Остаточная индукция, *тл* . . .	0,2	0,14	0,24	0,25	0,22	0,19	0,18
Точка Кюри, не ниже, °С	140	140	240	230	250	260	270
Коэффициент прямоугольности	0,93	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,86

цаемости при малых значениях прилагаемых усилий пропорциональны величине возникающих в материале напряжений. Эго явление, называемое иногда пьезомагнетизмом, несомненно будет использоваться в недалеком будущем в различного рода датчиках для измерения напряжений. На рис. 6 приводится кривая, показывающая изменение магнитной проницаемости ферромагнетика, вызванное сжатием тороидального сердечника с силой *F*. Для сравнения приводится также кривая изменения μ под действием постоянного смещающего поля *H*.

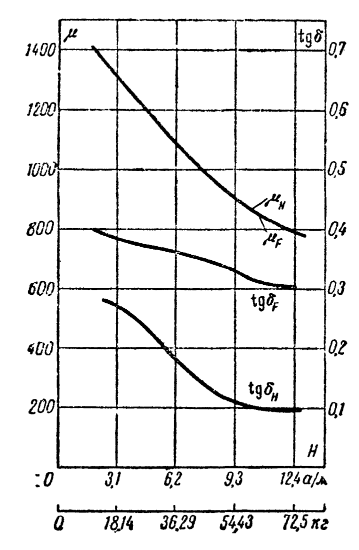


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости и тангенса угла потерь от приложенной силы и смещающего поля.

Очень близким по своей природе к пьезомагнетизму является обратное явление — относительное изменение длины (порядка 10^{-5}) при намагничивании ферромагнитного тела, называемое магнитострикцией или эффектом Джоуля. Магнитострикцией обычно называют продольное изменение размеров вследствие намагничивания, однако более правильно распространить это понятие и на все другие виды деформаций, вызываемых намагничиванием: поперечную магнитострикцию (нормальную по отношению к направлению поля) и объемную магнитострикцию.

В последнее время магнитострикцию начали использовать как в промышленной электротехнике (генераторы звуковых и ультразвуковых колебаний), так и в электронике (высокостабильные генераторы, электромеханические фильтры и др.).

Применение магнитострикционнных элементов в фильтрах промежуточной частоты позволяет иметь очень высокую добротность наряду с высоким коэффициентом прямоугольности фильтра (порядка 1,5—2). Ширина полосы пропускания фильтров может быть установлена от десятков герц до десятков килогерц при средних частотах от десятков килогерц до 1 *Мгц*.

В магнитострикционных преобразователях используются тесно связанные между собой следующие явления: преобразование электрических колебаний в механические (магнитострикция), механическая фильтрация (за счет собственных упругих колебаний стержня), преобразование механических колебаний в электрические (пьезомагнетизм).

Магнитострикционные ферриты выделены в особую группу магнитных материалов вследствие их высоких магнитомеханических свойств — большой магнитострикции в сочетании с достаточно высокой начальной магнитной проницаемостью.

Нашей промышленностью выпускаются магнитострикционные фильтры ряда марок, параметры которых приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры магнитострикционных ферритов

Марка феррита	Механическая добротность (не менее)	Параметры		
		Температурный коэффициент резонансной частоты в интервале температур	Температурный коэффициент индуктивности	Скорость распространения упругих колебаний, *см/сек*
15СП	2 600—2 800	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$ (от +10 до +60)	$500 \cdot 10^{-6}$	$(5,4 \div 5,7) \cdot 10^{5}$
12СК ($d_н$=5,5 *мм*)	2 000	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$ (от +10 до +70)	$500 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{5}$
12СК ($d_н$=3*мм*)	1 500—2 000	$\pm 15 \cdot 10^{-6}$ (от +10 до 70)	$500 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{5}$

Примечания: 1. Числа в скобках в третьей графе означают интервал температур.
2. $d_н$ — наружный диаметр сердечника.

КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ С МАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Катушки индуктивности являются одними из основных деталей современной электронной аппаратуры. Они входят в резонансные контуры, фильтры, трансформаторы и используются в качестве дросселей.

Применение магнитных сердечников улучшает параметры катушек, сокращает их габариты, в ряде случаев наделяет их новыми свойствами, расширяет область их использования. Катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками используют в элементах памяти, в магнитных антеннах, служат вентилями СВЧ, элементами магнитной перестройки.

Свойства ферритовых сердечников почти целиком определяют параметры и конструкции катушек индуктивности.

Магнитные сердечники катушек индуктивности подразделяются на сердечники с «незамкнутым» магнитным потоком: цилиндрические, пластинчатые, трубчатые и сердечники с замкнутым магнитным потоком: броневые, кольцевые (тороидальные) и Ш-образные (рис. 7). Каждый из названных видов сердечников делится на несколько типов, различающихся размерами.

Катушки индуктивности радиочастотного диапазона чаще всего конструируют с цилиндрическими сердечниками, обеспечивающими наибольшую добротность. Сердечники прямоугольного сечения применяют значительно реже, обычно в тех случаях, когда добротность катушки не является решающим фактором, или же по технологическим соображениям изготовления сердечников,

Катушки индуктивности с магнитными сердечниками могут быть как с постоянной, так и с регулируемой величиной индуктивности. Первые обычно применяют в качестве дросселей, а вторые — в одиночных резонансных контурах и фильтрах. Регулирование индуктив-

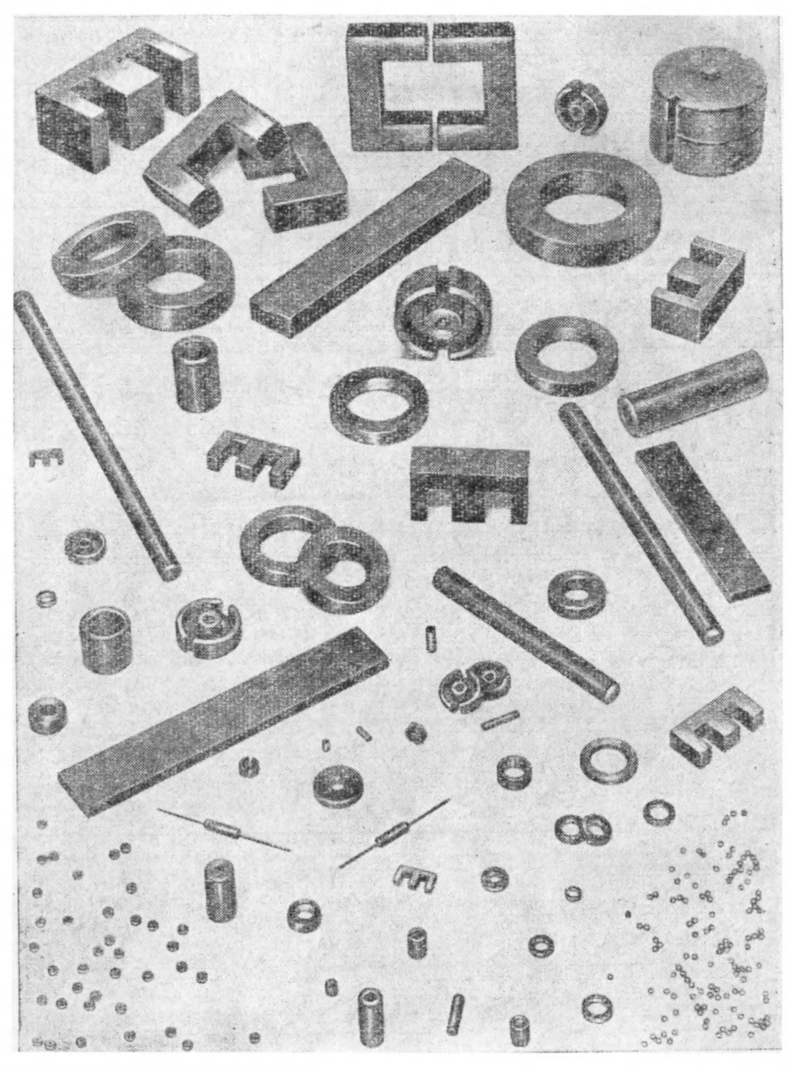


Рис. 7. Ферритовые сердечники для катушек индуктивности и магнитных антенн.

ности может осуществляться изменением немагнитного зазора, положения сердечника относительно каркаса катушки либо введением дополнительного магнитного середчника (подстроечника) в полую часть основного сердечника.

Для изготовления сердечников трансформаторов и вариометров, изменение частот настройки которых осуществляется с помощью дополнительных обмоток, в большинстве случаев используются те же материалы, что и для сердечников одиночных катушек индуктивности.

Значительный интерес представляет использование сердечников в элементах цепей, в которых обмотки в явном виде отсутствуют. Здесь ферриты играют роль среды, окружающей токоноситель и изменяющей его свойства. Эта область применения ферритов, несомненно, имеет большое будущее. Некоторые из подобных применений ферритов описаны ниже.

Основными параметрами катушек являются индуктивность и величина потерь, а также изменение их при воздействии окружающей среды (температуры, влажности, внешних магнитных полей и др.). В ряде применений катушек с магнитными сердечниками одним из важнейших их параметров является стабильность — постоянство индуктивности во времени при температурных изменениях и воздействиях других внешних факторов.

Индуктивность катушки с магнитным сердечником зависит от числа витков, формы и материала сердечника. Наиболее прост расчет индуктивности катушек с кольцевыми сердечниками, где эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu_{эфф}$ соответствует начальной магнитной проницаемости материала $\mu_н$. Расчет индуктивности катушек с броневым сердечником возможен лишь после определения величины эффективной магнитной проницаемости. Обычно ее определяют, измеряя индуктивность катушки с сердечником ($L_с$) и без него (L_0) с последующим вычислением по формуле

$$\mu_{эфф} = \frac{L_с}{L_0}. \qquad (5)$$

Для сердечников простых конфигураций, например цилиндрических, величина $\mu_{эфф}$ может быть рассчитана, а для других конфигураций определяется только опытным путем.

Потери в катушках индуктивности принято характеризовать добротностью Q — отношением реактивного сопротивления на данной частоте к активному сопротивлению потерь. Общие потери в катушке индуктивности с магнитным сердечником слагаются из потерь в сердечнике (магнитные потери) и потерь на активном сопротивлении обмотки. В большинстве случаев магнитные потери значительно больше потерь на сопротивлении обмотки и поэтому последние обычно не учитываются. Следует иметь в виду, что сопротивление магнитных потерь $r_м$ не является постоянным; помимо того, что оно зависит от частоты f, оно является функцией амплитуды намагничивающей силы и индуктивности:

$$r_м = hLHf + sLf^2 + nfL, \qquad (6)$$

где h, s и n — постоянные, зависящие от свойств магнитного материала и пропорциональные коэффициентам потерь на гистерезис, вихревые токи и последействие соответственно.

Коэффициенты потерь h, s и n могут быть названы постоянными лишь условно в сравнительном узком интервале частот и значений напряженности поля. Поэтому они имеют вспомогательное значение и применяются для оценки свойств материала сердечника в определенных условиях. Порядок величин h/μ^2 и n/μ приведен в табл. 6.

Таблица 6

Значения коэффициентов потерь ферритов

μ_0 феррита	n/μ, % на частоте, *Мгц*					h/μ^2, *см/ка*
	0,3	1	3	10	30	
700—1 500	0,01—0,04	>0,04	—	—	—	0,0005—0,005
100—700	0,008—0,03	0,015—>0,4	>0,02	—	—	0,001—0,03
20—80	—	—	0,02—0,15	0,05—0,2	0,1—0,4	0,4—0,2 —
4—10	—	—	—	—	0,3—0,7	—

Примечание. Коэффициент s/μ для ферритов пренебрежимо мал.

Изменения температуры внешней среды, разогрев аппаратуры во время работы налагают жесткие требования к постоянству параметров катушек индуктивности — температурной стабильности в широком диапазоне температур.

Основным параметром, определяющим температурную стабильность катушек индуктивности, является температурный коэффициент индуктивности (ТКИ). Он характеризует относительное изменение индуктивности катушки при изменении температуры на 1° С и определяется по формуле

$$\alpha_L = \frac{L_2 - L_1}{L_1 (T_2 - T_1)} = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T_1}, \tag{7}$$

где L_1 — индуктивность катушки при температуре T_1;
L_2 — индуктивность ее при T_2.

Значение ТКИ складывается из нескольких коэффициентов, учитывающих изменения размеров обмотки, зазора, собственной емкости, магнитной проницаемости и некоторых других величин.

Для катушек индуктивности с ферритовыми сердечниками, в особенности с замкнутым магнитным потоком, ТКИ в основном определяется температурным коэффициентом магнитной проницаемости сердечника,

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С «НЕЗАМКНУТЫМ» МАГНИТОПРОВОДОМ

К этому типу катушек относятся высокочастотные дроссели, катушки магнитных антенн и некоторые разновидности контурных катушек высокой добротности.

Дроссель должен обладать большим сопротивлением для переменного тока и в то же время малым сопротивлением постоянному току. Эти сопротивления и являются основными параметрами дросселя, которые необходимо знать при его конструировании и использовании.

Число витков дросселя определяется необходимой индуктивностью. Однако наличие собственной емкости (межвитковой, межслоевой) может привести к вредным резонансам, которые особенно нежелательны при использовании дросселей в широком диапазоне частот. Применение ферритовых сердечников расширяет рабочий диапазон частот дросселей, исключая в большинстве случаев явления резонанса.

Частота собственного резонанса дросселя определяется величиной его собственной емкости. Чем меньше эта емкость, тем при большей частоте проявляются резонансные явления. Наименьшая собственная емкость дросселя получается при однослойной намотке. Выводы обмотки дросселя можно крепить на сердечнике. Для этого его концы серебрят, залуживают и подпаивают к ним выводы обмотки и жесткие проводники для крепления в монтаже.

Для увеличения полосы пропускания дросселей в диапазоне коротких волн наиболее целесообразно применять сердечники из феррита марки 700НМ. Вследствие того что с повышением частоты уменьшается диэлектрическая проницаемость феррита, а выше граничной частоты и магнитная проницаемость (см. рис. 3), дроссели с ферритовыми сердечниками обладают как бы переменной индуктивностью и собственной емкостью, зависящими от частоты. Тем самым исключаются резонансные явления в широком диапазоне частот. Возрастание потерь в ферритах за пределами граничной частоты также играет положительную роль, сглаживая резонансные явления.

Конструкция дросселя с ферритовым сердечником достаточно проста: на стержень накладывают слой конденсаторной бумаги или диэлектрической пленки, на который наматывают однослойную обмотку.

На рис. 8 показаны сравнительные размеры дросселей с цилиндрическим ферритовым сердечником и без него при одной и той же индуктивности.

Стержневые ферритовые сердечники изготавливают из материала марки 600НН следующих типоразмеров: СС1,2×10; СС1,8×12; СС3,5×20 и СС3,5×30. Первое число в обозначении типоразмера указывает диаметр, а второе — длину сердечника в миллиметрах.

Кроме того, из феррита марки 400НН изготавливают трубчатый сердечник СТ10×4×25. Первое число в этом обозначении указывает внешний диаметр, второе — внутренний диаметр и третье — длину сердечника в миллиметрах.

Для расчета дросселей с цилиндрическими сердечниками необходимо знать эффективную магнитную проницаемость феррита $\mu_{эфф}$ На рис. 9 приведены кривые зависимости эффективной проницаемости от отношения длины сердечника к его диаметру (l/d). Зная это

отношение и полагая, что однослойная обмотка полностью покрывает сердечник, нетрудно определить число витков обмотки дросселя:

$$w = \sqrt{\frac{L_{др}}{L' d_к \mu_{эфф}}}, \qquad (8)$$

где $d_к$ — диаметр обмотки, *см*.

Значение коэффициента L', зависящего от отношения $l_к/d_к$, определяют по графику на рис. 10, где $l_к$ и $d_к$ — длина и диаметр обмотки. Необходимая величина индуктивности дросселя $L_{др}$ (в микрогенри) определяется на нижней частоте диапазона из условия $Z_{др} > Z_н$, где $Z_н$ — полное сопротивление нагрузки, *ом*.

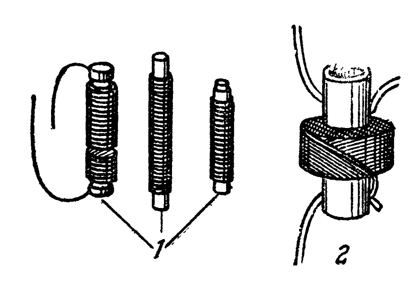


Рис. 8. Сравнительные размеры высокочастотных дросселей с ферритовыми сердечниками (*1*) и без сердечника (*2*) с одинаковыми величинами индуктивности.

Кроме цилиндрических сердечников, в дросселях возможно применение и кольцевых сердечников. В этом случае необходимо помнить о зависимости проницаемости сердечника от подмагничивающего поля. Для более высоких частот и в случае значительных токов подмагничивания, протекающих через дроссель, необходимо применять ферриты с меньшей проницаемостью или вводить в сердечник воздушный зазор, например, раскалывая его на две половины.

Основное конструктивное отличие магнитных антенн от высокочастотных дросселей заключается в том, что длина катушки существенно меньше длины сердечника. Поэтому если «катушечная» проницаемость $\mu_к$ (коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличивается индуктивность катушки при введении в нее магнитного сердечника) высокочастотных дросселей примерно равна эффективной проницаемости $\mu_{эфф}$ при условии, что намотка полностью покрывает весь сердечник), то для магнитных антенн величина $\mu_к$ существенно меньше и не превышает 6—11.

От эффективной магнитной проницаемости сердечника магнитной антенны зависит ее действующая высота, определяемая формулой

$$h_{м.а} = \frac{2\pi S}{\lambda} \mu_{эфф} w, \qquad (9)$$

где S — площадь сечения сердечника, *м*²;
λ — длина волны, *м*;
w — число витков антенной катушки.

При выборе сердечника для магнитной антенны необходимо стремиться к уменьшению магнитных потерь в ее рабочем диапазоне: добротность ненагруженной антенной катушки должна быть не менее 100. В длинноволновых антеннах (диапазон 30 — 300 *кгц*) применяют сердечники с начальной магнитной проницаемостью 1 000,

в средневолновых — 400 или 600, коротковолновых — 200—100 и в ультракоротковолновых (частоты от 30 *Мгц* и выше) — 50 и менее.

Форма сердечников магнитных антенн чаще всего цилиндрическая с тем бо́льшим отношением длины к диаметру, чем выше магнитная проницаемость феррита. Так, если для сердечников с $\mu_н$ по-

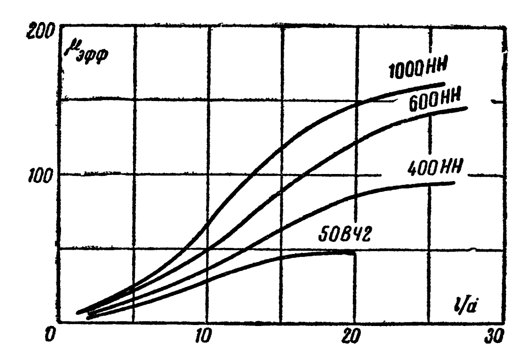


Рис. 9. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от отношения l/d для сердечников из ферритов с различной магнитной проницаемостью.

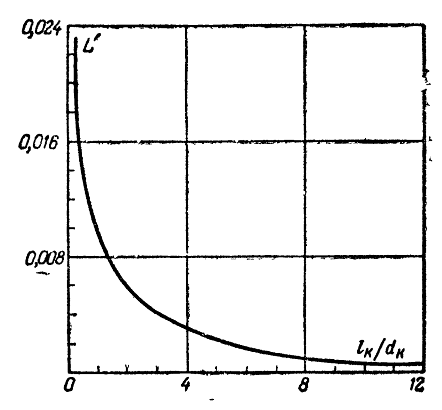


Рис. 10. Зависимость коэффициента L' от отношения $l_к/d_к$.

рядка 1 000 отношение l/D достигает значения 20—25, то для сердечников УКВ антенн оно равно 8—10. Пластинчатые сердечники применяют реже.

В настоящее время у нас стандартизованы для приема СВ и ДВ антенные цилиндрические сердечники из феррита марки 400НН следующих размеров: 8×10, 8×80, 8×100, 8×125, 8×140, 8×160

и 10×200 *мм*, а также плоские размерами 16×4×80, 16×4×100, 16×4×125, 20×3×100 и 20×3×125 *мм*.

Выбор материала и размера сердечника производится, исходя из назначения и рабочего диапазона антенны, а число витков определяется требуемой величиной индуктивности входного контура (антенной катушки). Расчет производят по вышеприведенной формуле (8) с той лишь разницей, что вместо $\mu_{эфф}$ подставляется $\mu_к$.

Цилиндрическую форму имеют также сердечники магнитострикционных и электромеханических фильтров. Изготовление и налаживание этих фильтров требует высокой степени точности и производится в заводских условиях.

Катушки с «незамкнутым» магнитным потоком находят себе применение везде, где требуется уменьшить габариты катушек без ухудшения, а иногда и с целью улучшения добротности. Так, применение цилиндрических «коротких» сердечников из материала 30ВЧ2 позволяет получать высокодобротные коротковолновые катушки с добротностью 500 и выше.

Особо следует остановиться на использовании ферритовых сердечников для перестройки контуров приемных устройств. Изменение индуктивности контуров осуществляют путем изменения длины сердечника, находящегося внутри катушки индуктивности. Такой метод перестройки применяется в некоторых автомобильных приемниках, обеспечивая меньший объем, занимаемый органами настройки, высокую виброустойчивость элементов настройки и исключая трущиеся контакты. Для радиолюбителей этот вид настройки привлекателен также возможностью изготовления блока переменных индуктивностей взамен более сложного в изготовлении блока переменных емкостей.

Основные параметры катушек индуктивности с «незамкнутым» магнитным потоком определяются в основном эквивалентной магнитной проницаемостью $\mu_{экв}$, при этом $\operatorname{tg}\,\delta$, температурная и временная нестабильность уменьшаются примерно в $\mu_н/\mu_{экв}$ раз. Величина $\mu_{экв}$ для дросселей совпадает с $\mu_{эфф}$, для других катушек такого же типа она определяется опытным путем, однако всегда можно считать, что $\mu_{экв} \leqslant \mu_{эфф}$.

При конструировании катушек индуктивности с цилиндрическими сердечниками полезно иметь в виду, что произведение $\mu_{эфф}\,Q = \text{const}$ в рабочем диапазоне частот. Это обстоятельство дает возможность, изменяя соотношение l/d (и изменяя таким образом величину $\mu_{эфф}$), добиться необходимого значения добротности катушки.

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С КОЛЬЦЕВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Катушки индуктивности и трансформаторы с кольцевыми сердечниками (рис. 11 и табл. 7) применяют в тех случаях, когда требуется при минимальных габаритах получить наибольшую индуктивность. Преимуществом их является малое рассеяние магнитного потока, а недостатком — относительная сложность намотки и невозможность плавной регулировки индуктивности.

Таблица 7

Кольцевые сердечники

Марганец-цинковые сердечники	Материал	Никель-цинковые сердечники	Материал
К5×3×1,5		К4×2,5×1,2	
К7×4×2		К4×2,5×1,6	
К7×4×4		К5×3×1	
К9×6×3		К6×3×24	
К9×6×6	2000НМ	К7×4×2	50В42
К10×6×3	1500НМ	К10×6×3	30В42
К10×6×4	1500НМ1	К10×6×5	20В4
К16×8×6	1100НМ	К12×6×4,5	2000НН
К16×10×4,5		К16×6×6	1000НН
К20×12×6		К20×10×5	600НН
К28×16×9		К20×12×6	400НН
К32×16×8		К32×16×8	
К40×25×7,5		К32×20×6	
		К40×25×7,5	
		К55×32×9	
		К100×60×15	
		К125×85×12	

Примечание. В обозначении кольцевого сердечника первая цифра означает наружный диаметр, вторая — внутренний диаметр, третья — высоту сердечника в миллиметрах.

Индуктивность (в микрогенри) тороидальной катушки с однослойной сплошной намоткой и сердечником прямоугольного сечения

$$L = 2\mu w^2 h \ln \frac{d_н}{d_в} 10^{-3},$$

где w — число витков катушки;

h — высота сердечника, *см*;

$d_н$ и $d_в$ — наружный и внутренний диаметры сердечника, *см*;

μ — магнитная проницаемость сердечника.

Более универсальна другая формула расчета индуктивности тороидальной катушки с сердечником любого сечения:

$$L = 0,4\pi w^2 \mu \frac{S}{l_{ср}} 10^{-8}, \qquad (10)$$

где S — площадь сердечника, *см*;

$l_{ср}$ — средняя длина магнитной силовой линии, *см*[1].

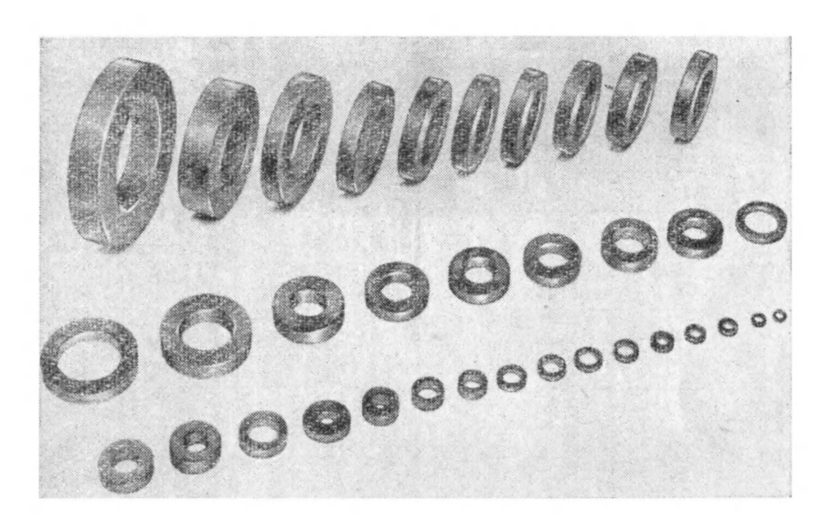


Рис. 11. Кольцевые ферритовые сердечники.

Для быстрых расчетов удобно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 12. Пример пользования ею дан в подписи под рисунком.

Несколько слов о параметре μ, используемом в формуле и номограмме. Одним из недостатков ферритов является изменение магнитной проницаемости сердечника при изменении величины магнитного потока Иначе говоря, изменение величины тока в обмотке вызывает изменение индуктивности катушки, которое обычно учитывается с помощью эффективной магнитной проницаемости $\mu_{эфф}$. Зависимость $\mu_{эфф}$ от амплитуды напряженности магнитного поля иллюстрирует рис. 4. Если через обмотку протекает постоянная составляющая тока, то в формулы (9) и (10) подставляют величину *обратимой* проницаемости μ_r, которая особенно резко изменяется

---

[1] Средняя длина магнитной силовой линии кольцевого сердечника определяется по формуле

$$l_{ср} = \pi \left(\frac{d_н + d_в}{2} \right).$$

от величины подмагничивающего поля $H_{под}$ у ферритов с высокой начальной магнитной проницаемостью. Под обратимой проницаемостью понимают среднее значение магнитной проницаемости для перемагничивания по частному циклу при данном $H_{под}$.

Зависимость магнитной проницаемости от подмагничивающего поля позволяет управлять параметрами цепей, содержащих магнитные элементы, путем изменения тока подмагничивания. Достоинством

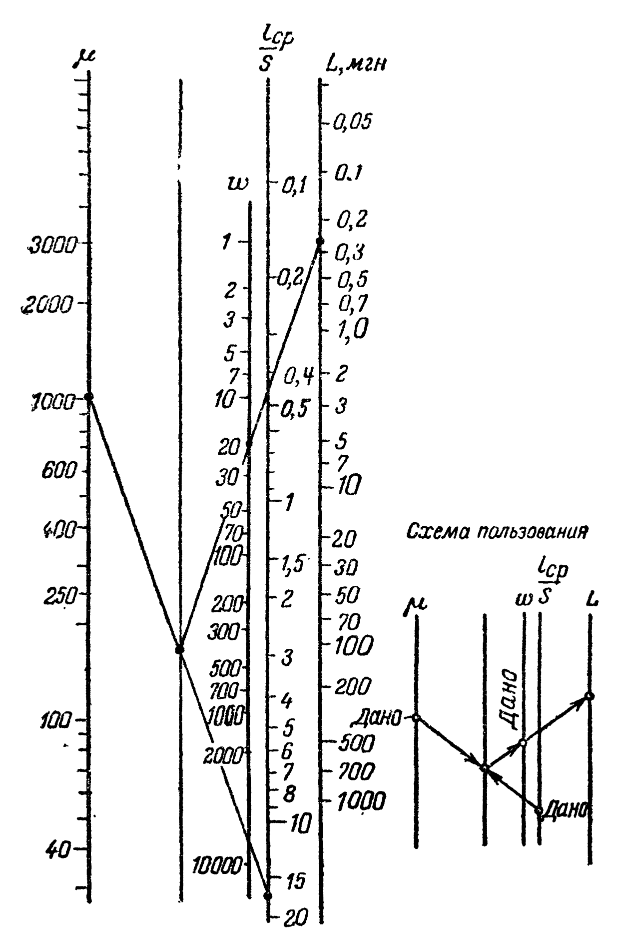


Рис. 12. Номограмма для определения индуктивности тороидальных катушек с ферритовыми сердечниками.

Пример. Дано: сечение кольца S=0,25 *см*²; $l_{ср}$=4,5 *см*; w=20; $\mu_н$ =1 000. Ответ: L=0,27 *мгн*.

такого метода, называемого иногда «магнитной настройкой», являются его безынерционность и простота. Магнитную настройку целесообразно использовать в системах автоподстройки, в генераторах качающейся частоты и т. п. Если использовать ферриты с высокой магнитной проницаемостью, пределы магнитной перестройки могут быть весьма значительны. На рис. 13 приведены кривые зависимости

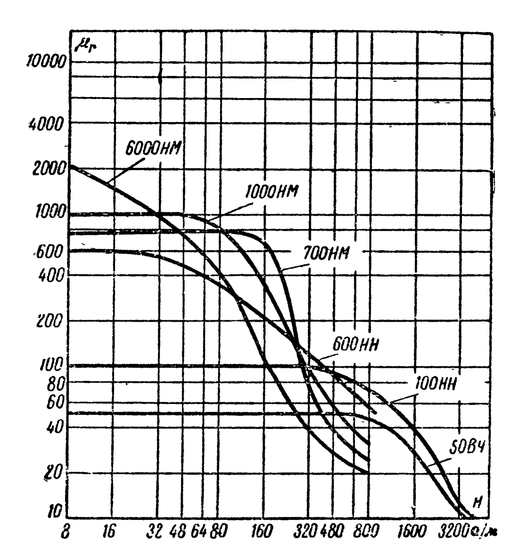


Рис. 13. Зависимость обратимой магнитной проницаемости от величины подмагничивающего поля.

величины μ_r для ферритов различных марок от постоянного намагничивающего поля.

Наиболее эффективны для использования в цепях, управляемых подмагничиванием, сердечники, изготовленные из ферритов следующих марок: 100НН, 60НН, 50ВЧ2 и 10ВЧ1.

Выбор диаметра и марки провода тороидальных катушек определяется числом витков, размерами сердечника и назначением катушки. Диаметры проводов и сопротивления обмоток катушек индуктивности на сердечниках размером $d_н \times d_в \times h = 70 \times 50 \times 10$ (сердечник I) и $38 \times 24 \times 7$ *мм* (сердечник II) определяют по графикам, приведенным на рис. 14, при условии, что магнитные потери малы по сравнению с потерями в активном сопротивлении провода, т. е. на низких частотах.

Требуемая добротность катушки индуктивности на звуковых частотах при минимальном ее объеме получается, если применить сердечник с отношением внутреннего радиуса к наружному 0,5—0,6 и высотой, примерно равной наружному радиусу.

Прогресс в развитии ферритов и требования микроминиатюризации и стандартизации привели к разработке ряда катушек индуктивности исключительно малых размеров. Такие микромодульные индуктивности с ферритовыми сердечниками (сокращенно ИФМ) применяют обычно в узлах электронных схем (модулях), заливаемых компаундом (рис. 15).

Предназначены ИФМ для работы в цепях постоянного и переменного тока величиной не более 5 *ма*. В составе микромодулей они могут работать в диапазоне температур от —60 до +85° С

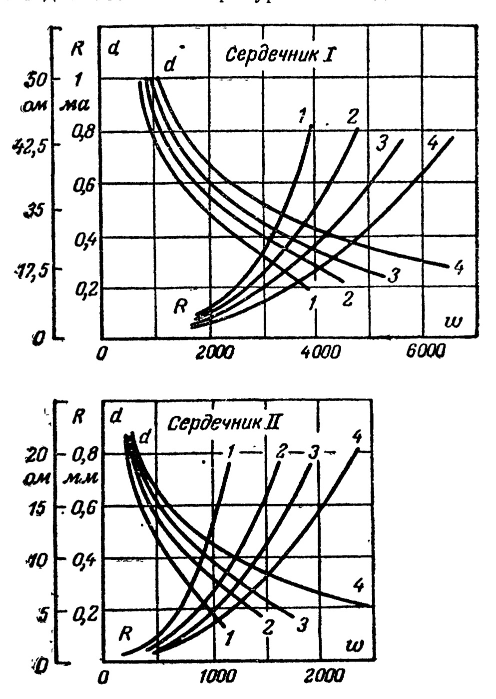


Рис. 14. Кривые для выбора оптимального числа витков и диаметра провода.

1 — для проводов ПБД и ПЭБД; *2* — для проводов ПЭШО и ПЭЛШО; *3* — для провода ПШО; *4*—для провода ПЭ.

Катушка индуктивности наматывается проводом диаметром 0,1 *мм* и менее на кольцевом сердечнике диаметром около 5 *мм*.

Монтируется катушка на керамической плате, сверху закрывается легким колпачком, предохраняющим катушку от попадания компаунда при заливке модуля. При индуктивности до 50 *мкгн* высота ИФМ в сборе 3 *мм*, при больших величинах *L* — 3,8 *мм*. Площадь платы — около 1 *см*². Максимальный вес микромодульной индуктивности 0,45 *г*. Катушки индуктивности изготавливаются сле-

дующих номиналов: 1; 1,25; 1,6; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 160; 250; 400; 630; 1 000; 1 600 *мкгн*. Отклонение величины индуктивности от номинала не превышает ±10%.

Добротность микромодульных катушек, несмотря на малые размеры, достаточно высока — нижний предел ее составляет 50—80 и лишь для номиналов свыше 1 000 *мкгн* — 20. Частота измерения добротности для катушек с индуктивностью 1—2,5 *мкгн* со-

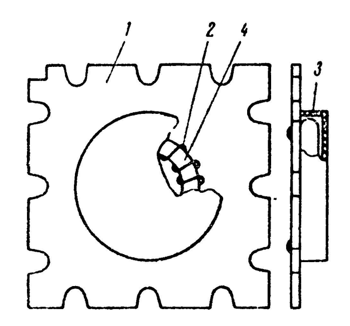


Рис. 15. Конструкция микромодульной катушки с постоянной индуктивностью на кольцевом сердечнике.

1 — керамическая плата; *2* — витки катушки индуктивности; *3* — колпачок; *4* — сердечник.

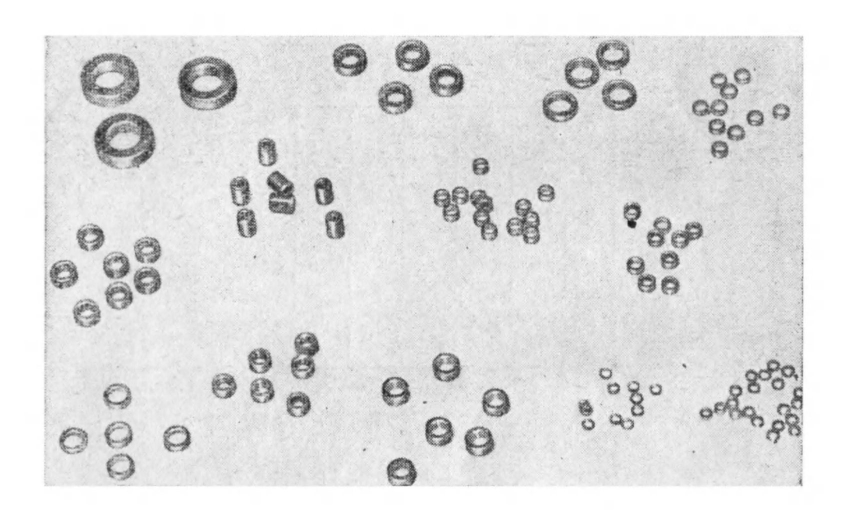


Рис. 16. Кольцевые сердечники с ППГ.

ставляет 15 *Мгц*; для $L=3{,}15 \div 16$ *мкгн* $f=5$ *Мгц*; для $L=20 \div$ $\div\ 100$ *мкгц* $f=2{,}5$ *Мгц*; для $L=160 \div 630$ *мкгн* $f=1$ *Мгц* и для $L=1\,000 \div 2\,500$ *мкгн* частота измерений равна 0,1 *Мгц*. Большинство микромодульных катушек имеют ТКИ, равный $\pm 1 \cdot 10^{-3}$, и только для трех последних номиналов он равен $\pm 7{,}5 \cdot 10^{-3}$.

Свойства катушек индуктивности с сердечниками ППГ зависят не только от свойств материала, но и от формы и размеров сердечника. В переключающих устройствах обычно применяют катушки, намотанные на кольцевых сердечниках с большим отношением наружного диаметра к внутреннему. Кольцевые сердечники с ППГ показаны на рис. 16. Сердечники для логических и переключающих устройств из ферритов 0,16ВТ, 0,25ВТ, 0,3ВТ, 0,3ВТ1, 0,4ВТ, 0,7ВТ изготавливают размерами от 2×1,3×0,7 до 10×6×2 *мм*, а сердечники для запоминающих устройств изготавливают из ферритов 0,9ВТ, 1,3ВТ, 2ВТ и 4ВТ размерами от 1×0,7×0,35 до 4×2,5×1,5 *мм*.

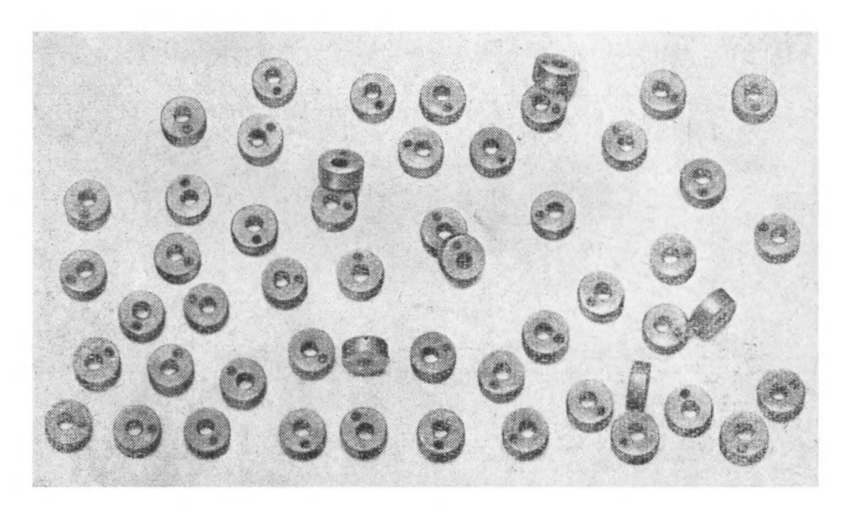


Рис. 17. Трансфлюксоры.

В настоящее время все чаще применяют многоотверстные тороидальные сердечники (рис. 17), которые работают по принципу распределения магнитных потоков в сложном магнитопроводе. Такие сердечники позволяют запоминать информацию с возможностью считывания без разрушения информации, и называются трансфлюксорами. Изготовляются они из феррита марки 1,3ВТ.

Принцип работы можно уяснить на примере наиболее простого двухотверстного трансфлюксора. Двухотверстный трансфлюксор имеет два неравных отверстия и перемычки *А*, *В* и *С* (рис. 18).

Запись исходного сигнала производится импульсом тока в обмотке, проходящей через большое отверстие. При достаточной величине тока в перемычке *С* устанавливается поток определенного направления, который разветвляется в перемычки *А* и *В*. Перемычки *А* и *В* выбираются обычно равными по ширине, но в сумме они должны оставаться тоньше перемычки *С*.

Когда остаточный поток в перемычках *А* и *В* имеет одинаковое направление, то говорят, что трансфлюксор заблокирован. Если ма-

териал имеет высокий коэффициент прямоугольности, то воздействие импульсов любой полярности в обмотке считывания не сопровождается наведением э. д. с. в выходной обмотке, так как перемычки *А* и *В* насыщены.

Привести трансфлюксор в рабочее состояние может импульс тока, проходящий через большое отверстие в направлении, противоположном импульсу блокировки, но такой величины, чтобы он перемагничивал только область материала, прилежащую к большому отверстию, в пределах перемычки *В*.

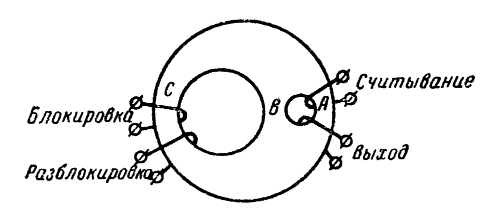


Рис. 18. К объяснению принципа работы трансфлюксора.

Ток блокировки берут такой величины, чтобы он изменил магнитное состояние перемычки *В*, но не смог изменить магнитное состояние перемычки *А*. При этом потоки для малого отверстия будут направлены согласно.

В этом случае импульс в обмотке считывания будет вызывать изменение магнитного состояния области вокруг малого отверстия на противоположное или повторять его. Тогда в первом случае, в выходной обмотке появится импульс достаточной величины, свидетельствующий о записанной информации, а во втором импульс будет незначительным.

Состоянию блокировки приписывают состояние «0», а разблокировки — состояние «1».

После снятия импульса считывания в перемычках *А* и *В* восстанавливается состояние, предшествующее считыванию, что соответствует считыванию без разрушения информации, которое можно производить сколько угодно раз без перезаписи.

В логических устройствах, где перспективно применение более сложных трансфлюксоров, используются те же принципы сложения потока, которые позволяют создавать логические цепи, реализующие определенные функции (например, сумматоры).

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С БРОНЕВЫМИ И Ш-ОБРАЗНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Броневые сердечники нашли широкое применение в резонансных контурах и фильтрах радиоэлектронной аппаратуры.

Стабильность параметров контура в основном определяется стабильностью параметров катушки индуктивности, так как конденса-

торы обычно вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к контурам. Температурный коэффициент индуктивности катушек с броневыми сердечниками из карбонильного железа находится в пределах $(60 \div 90)10^{-6}$ *град*$^{-1}$, катушек с сердечниками из альсифера — $(1 \div 30)10^{-6}$ *град*$^{-1}$ и катушек с ферритовыми сердечниками $(250 \div 300)\ 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, т. е. температурный коэффициент последних в несколько раз больше, чем у катушек с сердечниками из других магнитодиэлектриков. Исключение составляют катушки с сердечниками

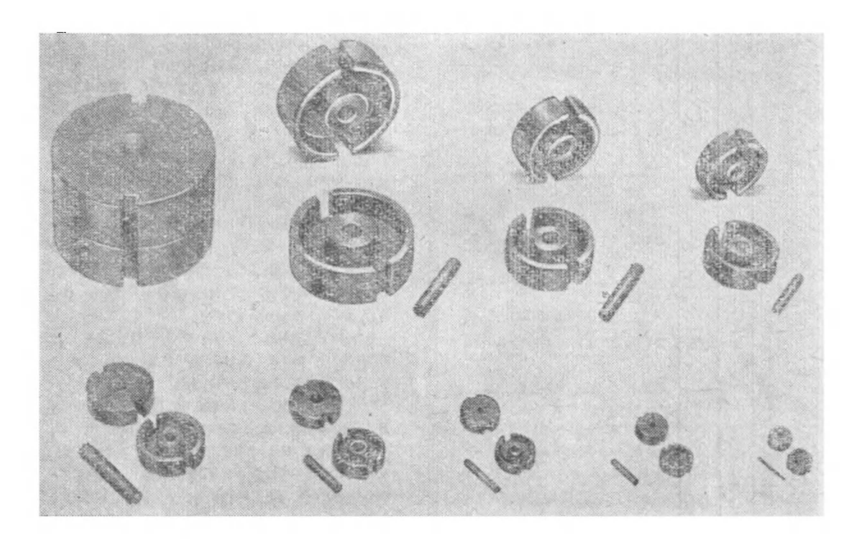


Рис. 19. Ферритовые броневые сердечники типа Б.

из феррита марки 20ВЧ, стабильность которых приближается к стабильности магнитодиэлектриков.

Благодаря более высокой эффективной проницаемости и меньшим потерям, применение ферритов для сердечников катушек индуктивности позволяет повысить их добротность или (при сохранении добротности) уменьшить габариты. Добротности катушек с сердечниками из ферритов в 1,5—2 раза превосходят добротности катушек с сердечниками из карбонильного железа. Так, например, броневые сердечники из феррита 1500НМ2 обеспечивают добротность до 500 на частоте 0,3—0,4 *Мгц*.

Замкнутый магнитопровод броневого сердечника образует магнитный экран, препятствующий рассеянию магнитного поля катушки, а следовательно, образованию паразитных связей. Поэтому броневые сердечники целесообразно применять в многокаскадных усилителях. Наличие магнитного экрана не исключает необходимости в установке электростатического экрана, что обеспечивает максимальную экранировку катушки.

Броневые сердечники типа Б (рис. 19 и табл. 8) состоят из двух

Таблица 8

Броневые сердечники

Тип сердечника	Размеры чашек, *мм*							Размеры подстроечника, *мм*		$l_{ср}/S_{эфф}$
	d	d_1	d_2	d_3	H	h	a	l	d_4	
Б14	14	11,8	6	3,1	4,2	2,9	2	2,5	12	0,142
Б18	18	14	7,4	3,1	5,3	3,7	2	2,5	12	0,194
Б22	22	18,3	9,2	4,5	6,8	4,7	3	3,5	16	0,220
Б26	26	21,6	11,3	5,5	8,2	5,6	3	4,5	20	0,276
Б30	30	25,4	12,3	5,5	9,5	6,6	4	4,5	22	0,289
Б36	36	30,5	16,0	5,5	11,0	7,4	3	4,5	22	0,414
Б48	48	40,0	20,0	7,5	15,7	10,4	4	6,5	32	0,513
Ч1	6,1	5,1	—	2,9	4,4	1,1	1,5	9,0	СпМ 2,3×0,5*	—
Ч2	6,1	5,1	—	2,9	4,4	1,8	1,5	9,0	СпМ 2,3×0,5*	—

* СпМ 2,3×0,5 — сердечник подстроечный миниатюрный, диаметр резьбы 2,3 *мм*, шаг 0,5 *мм*.

чашек, изготовленных из феррита марки 2000НМ1, 2000НМ, 1500НМ2 или 1500НМ3. Между внутренними кернами чашек может быть сделан зазор за счет укорочения керна на одной или обеих половинах сердечника. Сердечники выпускают с одним или с двумя пазами для вывода проводов (концов обмотки). Для регулировки величины индуктивности катушки внутрь керна сердечника вводится дополнительный цилиндрический сердечник — подстроечник. Изменение его положения относительно чашек позволяет изменять индуктивность в пределах ±10—20% (в зависимости от величины зазора). Подстроечник обычно крепится во втулке с резьбой.

Втулка ввинчивается в корпус или плиту, на которой укреплен сердечник.

Размер чашек и подстроечника, приведенные в табл. 8, указаны на рис. 20.

Обмотку катушки индуктивности наматывают на одно-, двух- или трехсекционном каркасе из полистирола или полиамидной смолы.

Величина индуктивности катушки зависит от материала сердечника, его размеров, величины зазора и числа витков. Первые три параметра определяют эффективную магнитную проницаемость сердечника — $\mu_{эфф}$, участвующую в определении витков по нижеприведенным номограммам. Для того чтобы определить $\mu_{эфф}$ броневого сердечника, наматывают «пробную» катушку на каркас, помещают ее в сердечник и измеряют ее индуктивность $L_{пр}$. Зная $L_{пр}$ и число витков пробной катушки $w_{пр}$, вычисляют $\mu_{эфф}$ по формуле

$$\mu_{эфф} = \frac{L_{пр}\, l_{ср} \cdot 10^9}{4\pi w^2\, S_{эфф}}, \qquad (11)$$

где $l_{ср}$ — средняя длина магнитной силовой линии сердечника, *см*;
$S_{эфф}$ — эффективное сечение сердечника, *см*^{2}.

Отношение $l_{ср}/S_{эфф}$ для сердечников типа Б берут из табл. 8. С целью упрощения расчетов катушек с броневыми сердечниками применяют номограммы (рис. 21—30).

По номограммам, приведенным на рис. 21—25, можно определить любой из трех параметров w, L или $\mu_{эфф}$ при известных двух других при намотке катушки на односекционном каркасе. По оси ординат

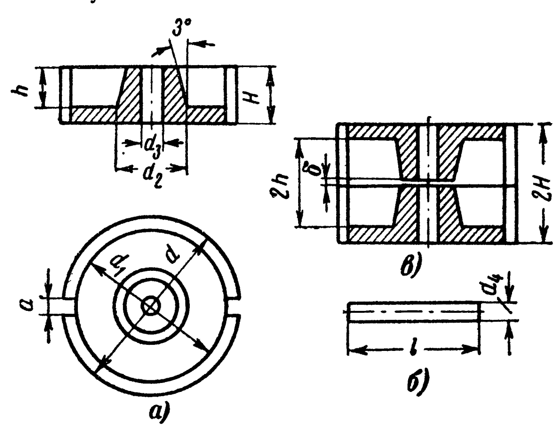


Рис. 20. Чашка (*а*), подстроечник (*б*) и сечение (*в*) броневого сердечника типа Б.

в логарифмическом масштабе отложены числа витков катушки w, по оси абсцисс — эффективная проницаемость $\mu_{эфф}$, наклонные кривые соответствуют различным индуктивностям. Индуктивность катушки отыскивается как значение наклонной линии, проходящей через точку пересечения прямых, соответствующих w и $\mu_{эфф}$.

Пример. Число витков на односекционном каркасе и сердечнике Б14 $w=60$; $\mu_{эфф}=60$.

Согласно рис. 21 $L=400$ *мкгн.*

Номограммы рис. 26—30 дают зависимость между числом витков w, сопротивлением r постоянному току и диаметром провода d катушки, намотанной до полного заполнения односекционного каркаса для различных сердечников.

По оси ординат в логарифмическом масштабе отложены числа витков, по оси абсцисс — диаметр провода d (по меди). Тип изоляции провода (ПЭЛ, ПЭВ-2, ПЭЛШО) указан на прямых, пересекающих наклонные линии сопротивления.

Пример. При использовании сердечника Б14ПЭЛ0,31 можно намотать не более 62 витков, при этом сопротивление катушки постоянному току — 0,42 *ом.*

Катушки индуктивности на сердечниках чашечного типа из феррита марки 1000НМ3 (рис. 31) применяют в фильтрах промежуточ-

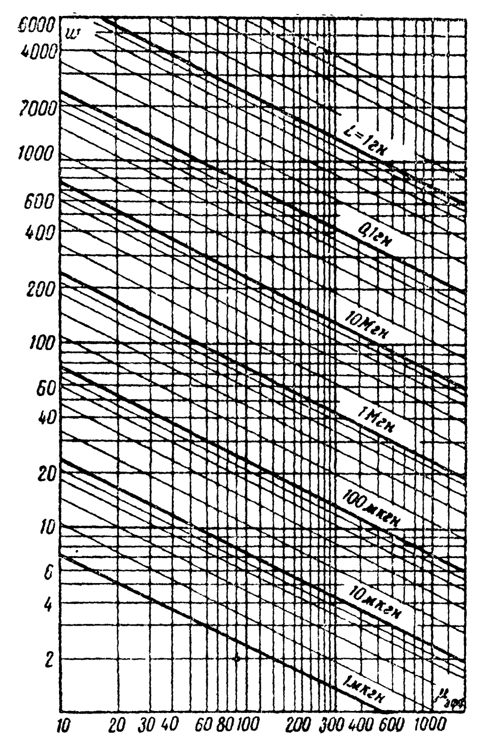


Рис. 21. Зависимость между $\mu_{эфф}$, w и L катушки с сердечником Б14.

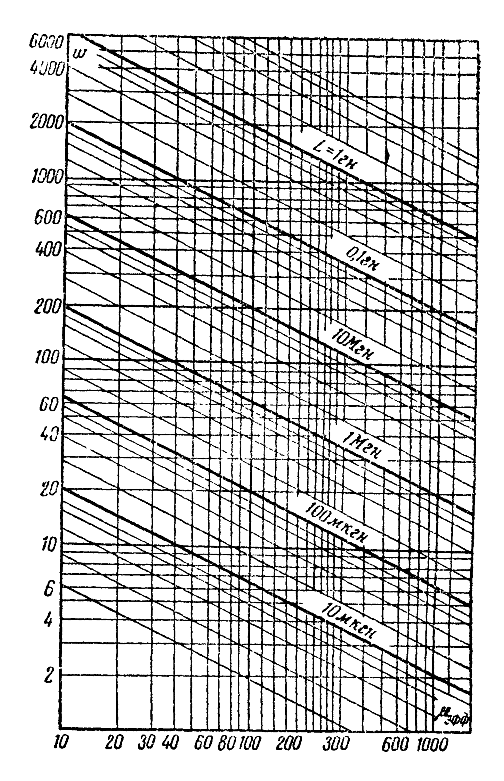


Рис. 22. Зависимость между $\mu_{эфф}$, w и L катушки с сердечником Б18.

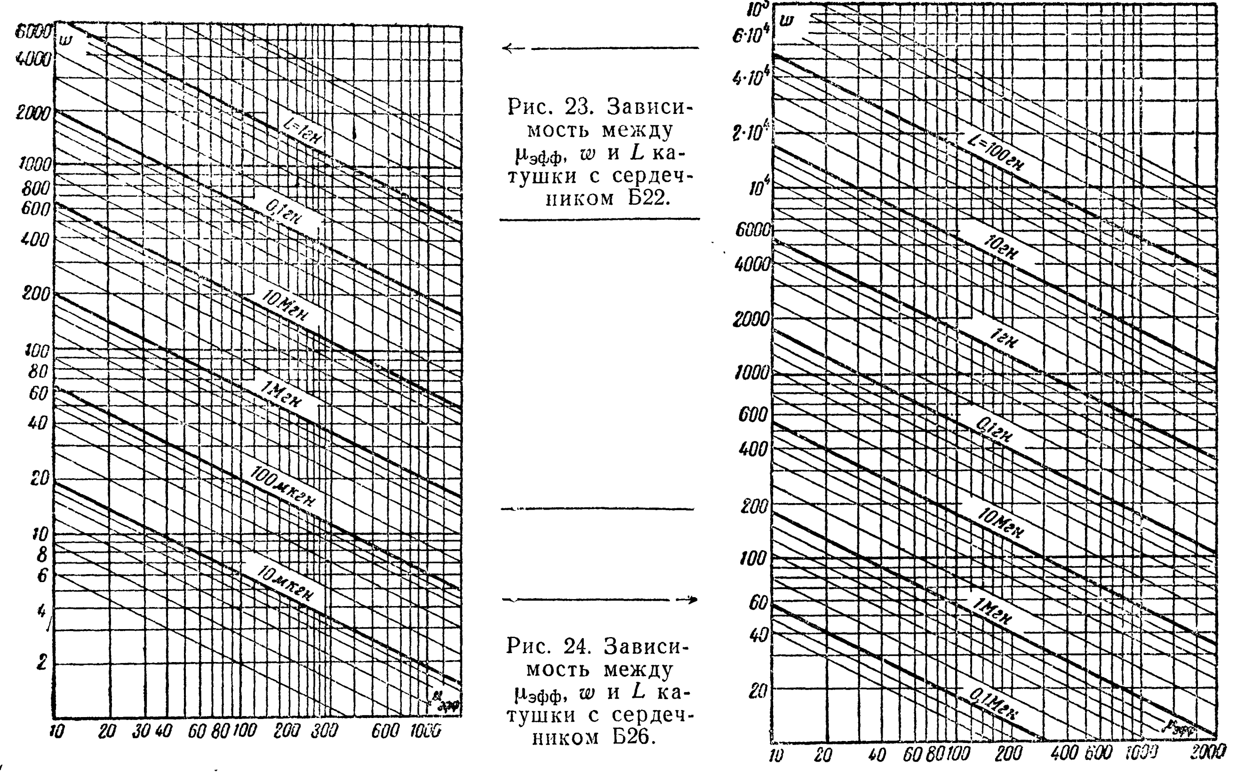
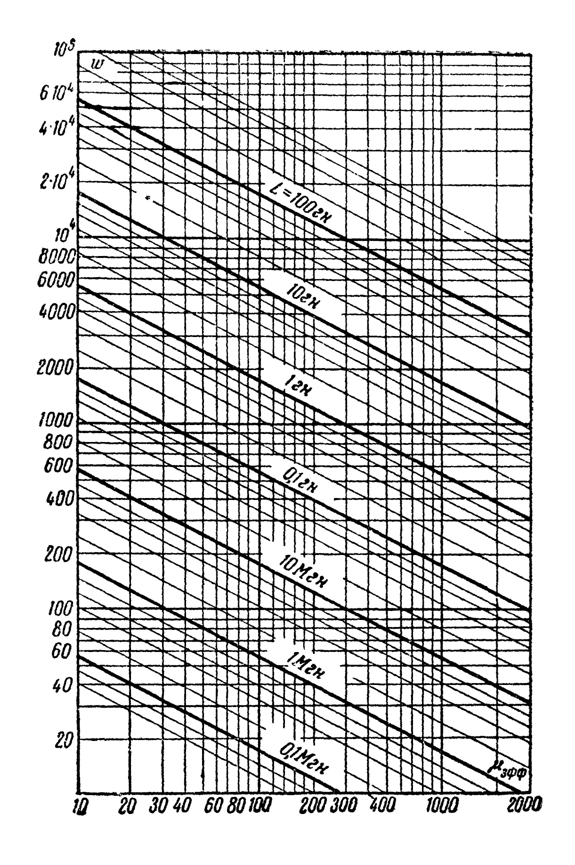


Рис. 23. Зависимость между $\mu_{эфф}$, w и L катушки с сердечником Б22.

Рис. 24. Зависимость между $\mu_{эфф}$, w и L катушки с сердечником Б26.



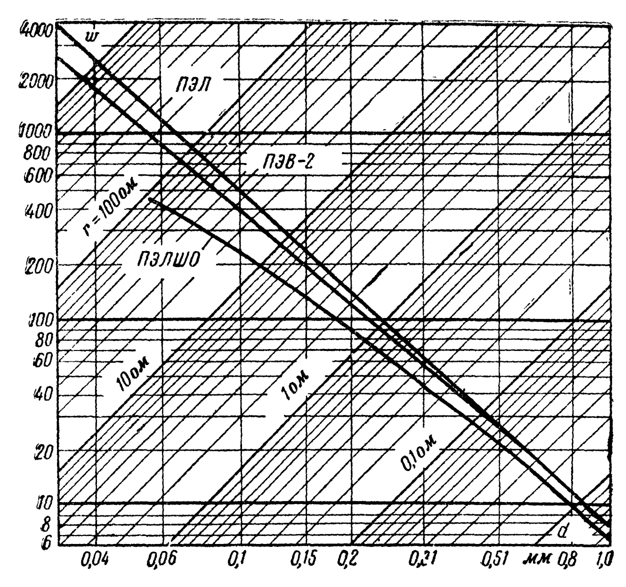


Рис. 26. Зависимость между w, d и r катушки с сердечником Б14.

Рис. 25. Зависимость между w, L и $\mu_{эфф}$ катушки с сердечником Б30.

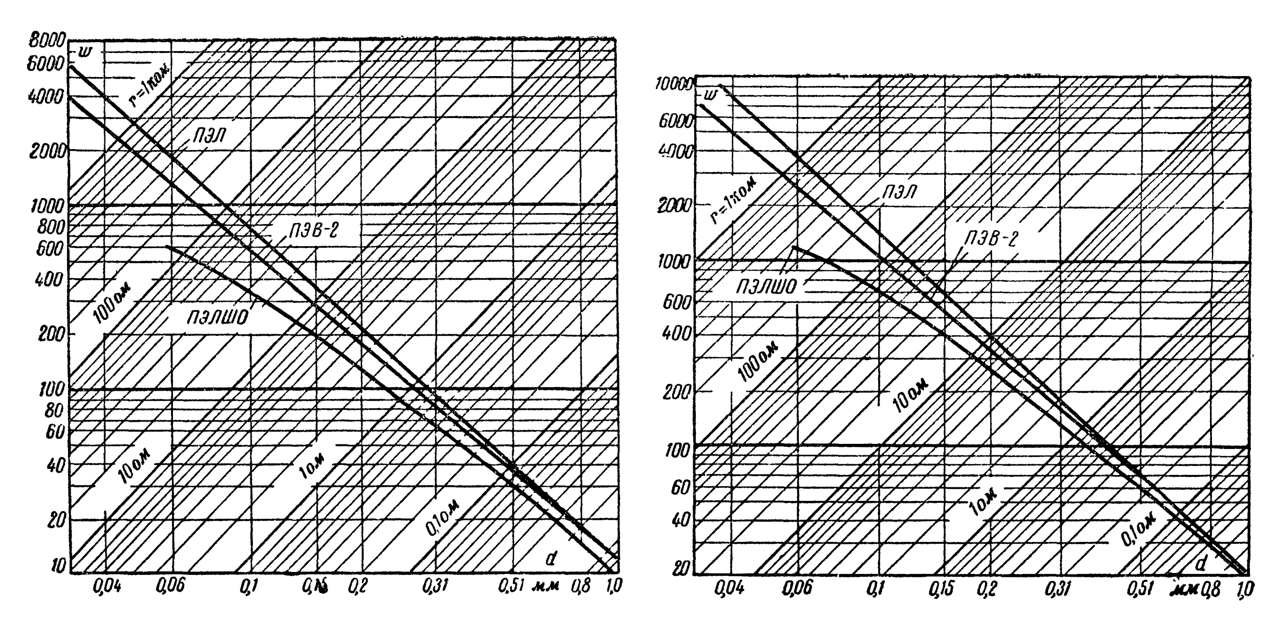


Рис. 27. Зависимость между w, d и r катушки с сердечником Б18.

Рис. 28. Зависимость между w, d и r катушки с сердечником Б22.

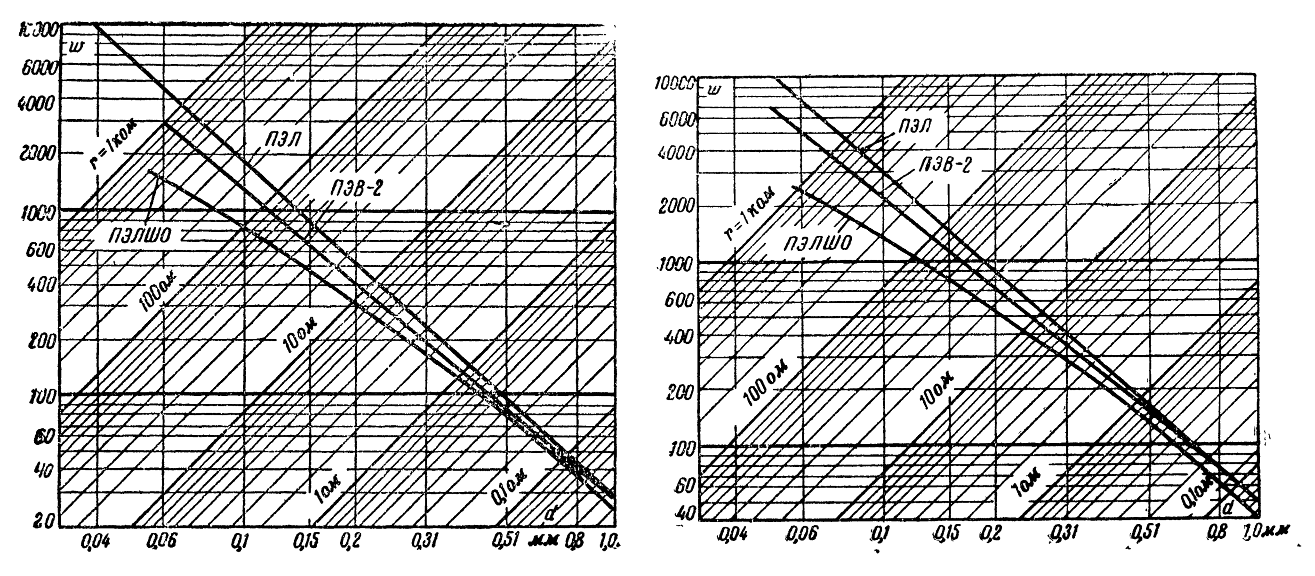


Рис. 29. Зависимость между *w*, *d* и *r* катушки с сердечником Б26.

Рис. 30. Зависимость между *w*, *d* и *r* катушки с сердечником Б30.

ной частоты малогабаритных приемников. Чашки сердечника не одинаковые — нижняя имеет толстое дно. Подстроечник сердечника имеет резьбу и прорезь для отвертки (рис. 32). Обычно он ввинчивается в основание гильзы сердечника, изготавливаемой из пластмассы.

Сердечники чашечного типа могут быть выполнены также в микромодульном исполнении (рис. 33), причем ТКИ микроминиатюрной катушки составляет $100 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ в интервале температур от 20 до 125° С и $150 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ в интервале от +20 до —60° С. С течением времени ТКИ уменьшаются.

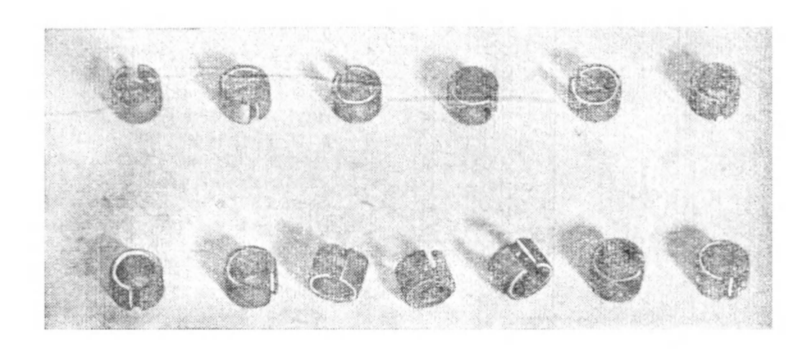


Рис. 31. Броневые сердечники типа Ч.

Для повышения температурной стабильности катушек целесообразно проводить искусственное старение сердечников, заключающейся в многократном нагревании их до 80° С и последующем охлаждении до комнатной температуры. После 20 циклов такой температурной обработки ТКИ понижается на 15—20%.

Катушки индуктивности с броневыми сердечниками, предназначенные для использования в герметических микромодулях, имеют сердечники типа Ч из феррита марки 1000НМ3 и 50ВЧ2. Выпускаются катушки в виде переменных (МКИП) и связанных (МКИС) индуктивностей. Диапазон индуктивности МКИП с сердечниками из 50ВЧ2 составляет 0,5—315 *мкгн*, а катушек со связанными индуктивностями — от 0,5 до 630 *мкгн*. Соответ-

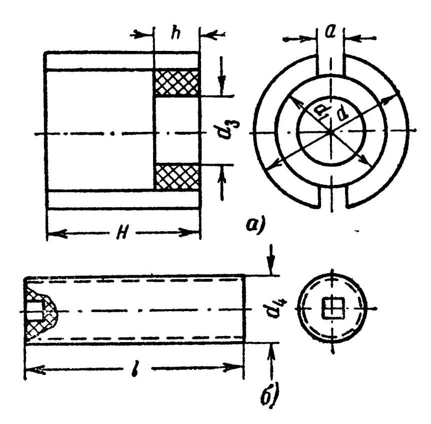


Рис. 32. Размеры чашки (*а*) и подстроечника (*б*) броневых сердечников типа Ч.

ственно для сердечников из феррита марки 1000НМ3 — от 360 *мкгн* до 0,4 *гн* и 1 000 — 2 500 *мкгн*. Изменение индуктивности катушек МКИП путем перемещения подстроечника (на 3—4 оборота) составляет 30%. Коэффициент связи в катушках МКИС равен 0,8. Добротность катушек обоих видов колеблется от 110 до 50. Гарантируемый заводом-изготовителем срок службы микромодульных индуктивностей — не менее 5 000 *ч*.

Рис. 33. Микромодульная катушка индуктивности.

1 — колпачок; *2* — ферритовая чашка с тонким дном; *3* — каркас катушки; *4*—подстроечник; *5* — витки катушки; *6* — ферритовая чашка с толстым дном; *7* — прокладка; *8* — керамическая плата.

К числу сердечников с замкнутым магнитным потоком относят также Ш-образные сердечники, применяемые в трансформаторах низкой частоты, преобразователях напряжения и в дросселях. Внешний вид сердечников показана на рис. 34. Достоинством ферритовых сердечников этой формы по сравнению с пакетами из Ш-образных пластин электротехнической стали является простота сборки, экономичность, а также меньшие потери в области звуковых и ультразвуковых частот. Ш-образные сердечники изготавливают из материала 2000НМ. Состоят они из двух одинаковых Ш-образных частей, складываемых шлифованными плоскостями (торцами). В зависимости от предъявляемых требований (рабочая частота, наличие подмагничивания постоянным полем) сердечники могут склеиваться с зазором, устанавливаемым подтачиванием керна (среднего выступа), или без зазора. В табл. 9 приведены размеры сердечников, выпускаемых нашей промышленностью. Обозначения размеров приведены на рис. 35.

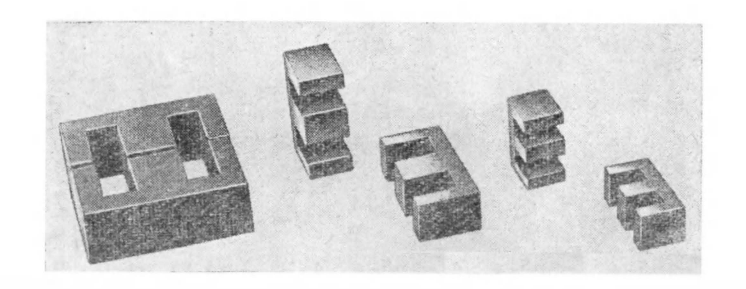


Рис. 34. Ш-образные ферритовые сердечники.

Таблица 9

Ш-образные сердечники

Тип сердечника	Размеры, *мм*					
	l_0, *мм*	*B*, *мм*	*L*, *мм*	2*H*, *мм*	l_1, *мм*	2*h*, *мм*
Ш4×4	4	4	16	16	3,2	10,4
Ш5×5	5	5	20	20	—	13
Ш6×6	6	6	24	24	5,0	16
Ш7×7	7	7	30	30	—	19
Ш8×8	8	8	32	32	—	23
Ш10×10	10	10	36	36	—	26

В строчных трансформаторах телевизоров применяют ферритовые сердечники П-образной формы (см. рис. 7). Сердечники состоят из двух одинаковых П-образных деталей со следующими размерами: 23 (ширина окна) × 15 (ширина сердечника)×15 (ширина сечения) из материала 600НН и 30×12×15 из материала 2000НМ. Первый тип используется в трансформаторе ТВС-70, второй — в ТВС-110.

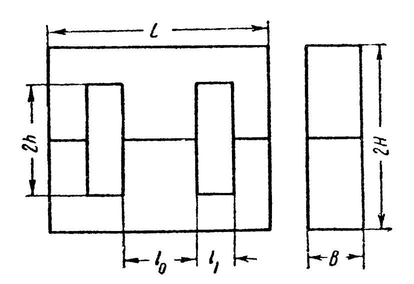


Рис. 35. Размеры Ш-образных сердечников.

Помимо упомянутых выше сердечников П-образной формы, ферритовые сердечники марки 600НН используются в отклоняющих системах телевизоров. Они имеют форму широкого кольца, расколотого термоударом на две равные половины. Ферритовые кольца отклоняющих систем выпускаются двух видов: с раструбом (внутренний диаметр 42 *мм*, наружный — 73 *мм*) и цилиндрические (внутренний диаметр 50 *мм*, наружный — 62 *мм*).

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Разнообразие функций, выполняемых катушками, и свойств ферритовых сердечников накладывает свой отпечаток на выбор методов и приборов, необходимых для измерения параметров катушек индуктивности с такими сердечниками.

Необходимо учитывать, что некоторые методы измерения индуктивности применительно к катушкам с ферритовыми сердечниками дают неточные результаты. Вместе с тем, неправильный выбор метода измерения может привести к необратимому ухудшению параметров катушек вследствие изменения магнитных свойств сердечников. Наконец, не все измерительные приборы позволяют получить характеристику катушки в желательном диапазоне изменения ее параметров.

На результаты измерения влияют такие второстепенные, на первый взгляд, факторы, как потоки рассеяния, собственные емкости и диэлектрические потери катушек. При измерениях катушек с сердечниками, обладающими высокой магнитной проницаемостью, на результатах измерений сказывается температура и влажность окружающей среды, атмосферное давление. Нормальными условиями измерений считаются: температура 15—35° С, относительная влажность 50—80% и давление 720—780 *мм рт. ст.* Если сердечники кату-

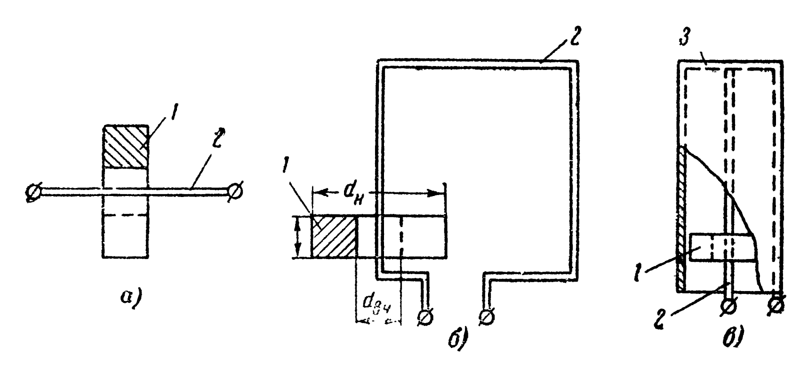


Рис. 36. Держатели для определения начальной магнитной проницаемости кольцевого сердечника.

а — прямой провод; *б* — рамка; *в* — коаксиальная линия; *1*—сердечник; *2*—провод с током; *3* — металлический стакан.

шек подвергались воздействию сильных магнитных полей, то перед измерениями их размагничивают полем с амплитудой, убывающей от 800 *а/м* до величины, допускаемой при измерениях (0,4—8 *а/м*) с частотой 50 *гц*. После размагничивания производится выдержка сердечников в течение 3 суток.

Измерение начальной магнитной проницаемости $\mu_н$ кольцевых сердечников. Необходимость таких измерений возникает тогда, когда нет уверенности в марке ферритового сердечника или неизвестна его предыстория.

Сердечник одевают на прямой коаксиальный провод *2* либо провод, изогнутый в виде рамки (рис. 36). Концы провода подсоединяют к мосту, куметру или другому измерительному прибору. Значение $\mu_н$ получают расчетом.

Измерения производят при напряженности поля не большей 0,4 *а/м* и частотах до 20 *кгц* для $\mu_н \geqslant 2\,000$ и 100 *кгц* для $2\,000 > \mu_н > 200$. Ферриты с проницаемостью, меньшей 200, измеряют на любой частоте, меньшей 10 *Мгц*, при этом напряженность поля может быть увеличена до 8 *а/м*.

Начальную проницаемость ферритов с $\mu_н \leqslant 100$ вычисляют по формуле

$$\mu_н - 1 = \frac{\Delta L}{L_A} \quad (12)$$

и ферритов с $\mu_н > 100$ — по формуле

$$\mu_н = \frac{\Delta L}{L_A}, \quad (13)$$

где L_A — индуктивность без сердечника прямого провода держателя, равная:

$$L_A = 4{,}6h \lg \frac{d_н}{d_{вн}} 10^{-9}; \quad (14)$$

ΔL — приращение индуктивности или взаимоиндуктивности держателя.

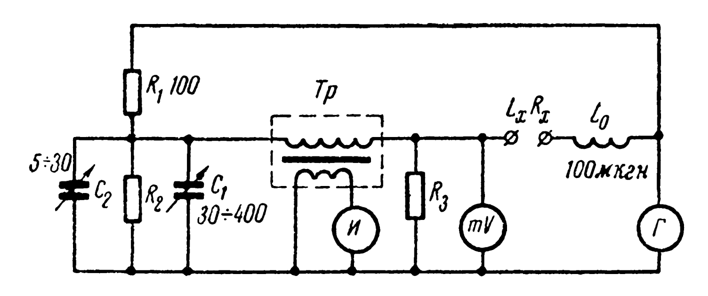


Рис. 37. Установка для измерения индуктивности L_x и сопротивления R_x (мост Максвелла).

Г — генератор типа ГЗ-33; C_1 — магазин емкости типа Р-513; C_2 — воздушный конденсатор переменной емкости; *Тр* — симметрирующий экранированный трансформатор; R_2 — переменный резистор.

Потери в сердечнике, определяемые тангенсом угла δ, вычисляют по результатам этих же измерений по формуле

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{\Delta R}{\omega \Delta L}, \quad (15)$$

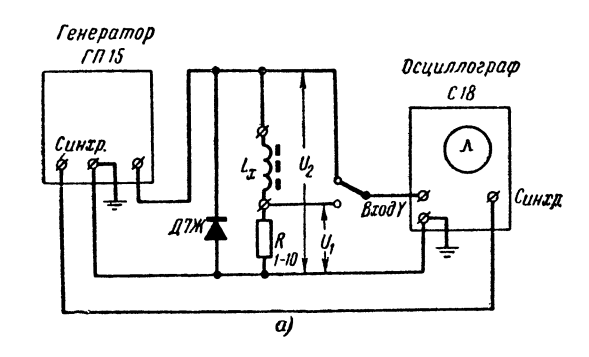
где ΔR — приращение активного сопротивления держателя.

Величины ΔL и ΔR обычно достаточно малы, поэтому при измерениях предпочтительно пользоваться высокочувствительными приборами типа моста Масквелла (рис. 37), исключив из него L_0; при измерениях параметров многовитковых катушек L_0 участвует. Могут быть использованы также приборы типа Е12-1, УИМ-1 и УИМ-2. Когда используют мост Максвелла, то производят начальную его балансировку по нулевому показанию индикатора при замкнутых накоротко зажимах L_x, R_x путем изменения емкости конденсатора C_1 и сопротивления резистора R_2. Контроль тока производят по показаниям милливольтметра, при этом значение напряжения в милливольтах численно соответствует току в микроамперах. Балансировку моста при измерениях производят изменением емкостей C_1, C_2 и сопротивления R_2. Индуктивность в микрогенри численно равна приращению емкости в пикофарадах, деленной на 10.

Элементы измерительной схемы размещают на столе в порядке, удобном для работы. Соединение их производят жесткими проводниками минимальной длины во избежание их перемещения в процессе измерений.

Правильность монтажа и точность измерений, обеспечиваемая схемой, проверяют путем контрольного измерения на ней прецизионной катушки индуктивности.

Измерители добротности (куметры) при измерении параметров катушек с ферритовыми сердечниками использовать не следует ввиду



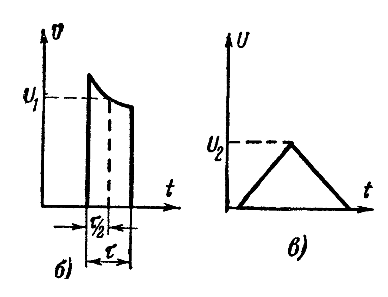


Рис. 38. Схема установки для измерения импульсной магнитной проницаемости (*а*) и эпюры импульсов (*б*) и (*в*).

отсутствия контроля за величиной намагничивающего поля и малой точности измерений, особенно при малых добротностях измеряемых катушек.

Температурный коэффициент индуктивности катушки определяют путем измерения индуктивности в некотором интервале температур и последующего расчета по формуле (7). Следует иметь в виду, что в диапазоне температур ТКИ изменяется нелинейно и даже меняет знак. Поэтому измерения целесообразно производить в ряде температурных интервалов, например: +60 — +20° С; +20 — 0° С; 0— —20° С; —20 — —60° С.

Нагрев (охлаждение) катушек индуктивности и их измерения желательно проводить в специальных камерах. Однако, пользуясь тепловой инерцией сердечников, можно разделить процесс нагрева (охлаждения) и измерение индуктивности, т. е. измерение производить сразу же после извлечения катушки из камеры.

Индуктивность и величину потерь катушек с сердечниками из феррита марок НМС и 2000НМ (предназначенных для использования в сильных полях) измеряют при магнитной индукции 0,1 *тл* (1000 *гс*) на частоте 16 *кгц* с использованием аппаратуры с точностью не хуже 10%, по вышеописанной методике, применяемой для определения $\mu_н$.

Импульсную магнитную проницаемость или импульсную индуктивность катушки с кольцевым сердечником измеряют на установке по схеме рис. 38, *а*.

Перед наложением обмотки на сердечник наносят два слоя конденсаторной бумаги. Для обмотки используют провод марки ПЭЛШО, наносимый в один ряд равномерно по всему периметру сердечника.

Прямоугольные импульсы генератора воздействием элементов схемы искажаются, приобретая форму, показанную на рис. 38, *б* и *в*. Режим измерений приведен в табл. 3. Необходимая величина намагничивающего тока определяется по формуле

$$i = \frac{H_{и.о}\, d_{ср}}{0,4w}, \qquad (16)$$

где

$$d_{ср} = \pi \frac{d_н - d_{вн}}{\ln \frac{d_н}{d_{вн}}}.$$

Измерения заключаются в последовательном определении величин U_1 и U_2, значения которых поясняются рис. 38, *б*. Сопротивление резистора R подбирается таким, чтобы выполнялось условие $U_1 \gg 50U_2$. Импульсную магнитную проницаемость сердечника вычисляют по формуле

$$\mu_и = \frac{100U_1\, \tau_и\, D_{ср}\, R}{0,4w^2\, SU_2}, \qquad (17)$$

где S — сечение сердечника.

Вопросы измерения ферритовых антенн разбираются в книге В. И. Хомича «Приемные ферритовые антенны», Госэнергоиздат, 1963.

РАСЧЕТ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Результатом расчета электрических параметров катушек индуктивности является выбор типа, материала и размеров сердечника, а также вида намотки, числа витков и марки провода.

Тип и материал сердечника обычно выбираются в зависимости от назначения катушки, требуемой добротности и устойчивости ее параметров при измерениях частоты, температуры и тока.

Добротность катушки на высоких частотах определяется в основном потерями в сердечнике. Максимальная добротность катушки с кольцевым сердечником достигается при наибольшем значении произведения $\mu\, Q$ в рабочем диапазоне частот.

Добротность катушки индуктивности с магнитным сердечником определяется по формуле

$$Q_R = \frac{Q_{об} Q_м}{Q_{об} + Q_м}, \qquad (18)$$

где $Q_{об}$ — добротность обмотки катушки без сердечника при условии, что ее индуктивность равна индуктивности катушки с сердечником;

$Q_м$ — добротность сердечника.

В зависимости от соотношения $Q_{об}$ и $Q_м$ решается вопрос о целесообразности зазора в сердечнике: если добротность обмотки выше добротности материала сердечника, то, вводя зазор, увеличивают добротность сердечника, а следовательно, и общую добротность катушки.

Путем выбора оптимальной величины зазора в сердечнике можно получить максимальную добротность катушки. Величина оптимального зазора определяется по формуле

$$l_з = \frac{l_{ср}}{\mu_н} \sqrt{\frac{Q_{об}}{Q_м} - 1}, \qquad (19)$$

где $\mu_н$ — магнитная проницаемость сердечника;

$l_{ср}$ — средняя длина силовой линии сердечника без учета зазора, *мм*.

Если величина $l_з$ получается отрицательной, то зазор не улучшает добротности.

Введение зазора позволяет улучшить стабильность параметров катушки. Если ТКИ катушки с замкнутым сердечником целиком определяется величиной ТКμ, то при введении зазора (при условии, что $l_з/l_{ср} \leqslant 0{,}01$) температурный коэффициент индуктивности равен:

$$ТКИ_з = \frac{ТК\mu}{1 + \frac{l_з}{l_{ср}} \mu_н}. \qquad (20)$$

Магнитная проницаемость сердечника с зазором определяется следующей формулой:

$$\mu_з = \frac{\mu_н}{1 + \mu_н \frac{q}{b}}, \qquad (21)$$

где $q = l_з/l_{ср}$ и $b = S/S_{ср}$ — отношение сечений зазора и сердечника (чаще всего $b = 1$).

При расчетах катушек индуктивности часто бывает необходимо найти величину собственной емкости катушки, определяющую верхнюю границу ее частотного диапазона. Собственную емкость можно приближенно вычислить, измерив предварительно индуктивность катушки на низкой частоте, когда влияние этой емкости практически неощутимо, а затем на более высокой частоте f_1. Если результат пер-

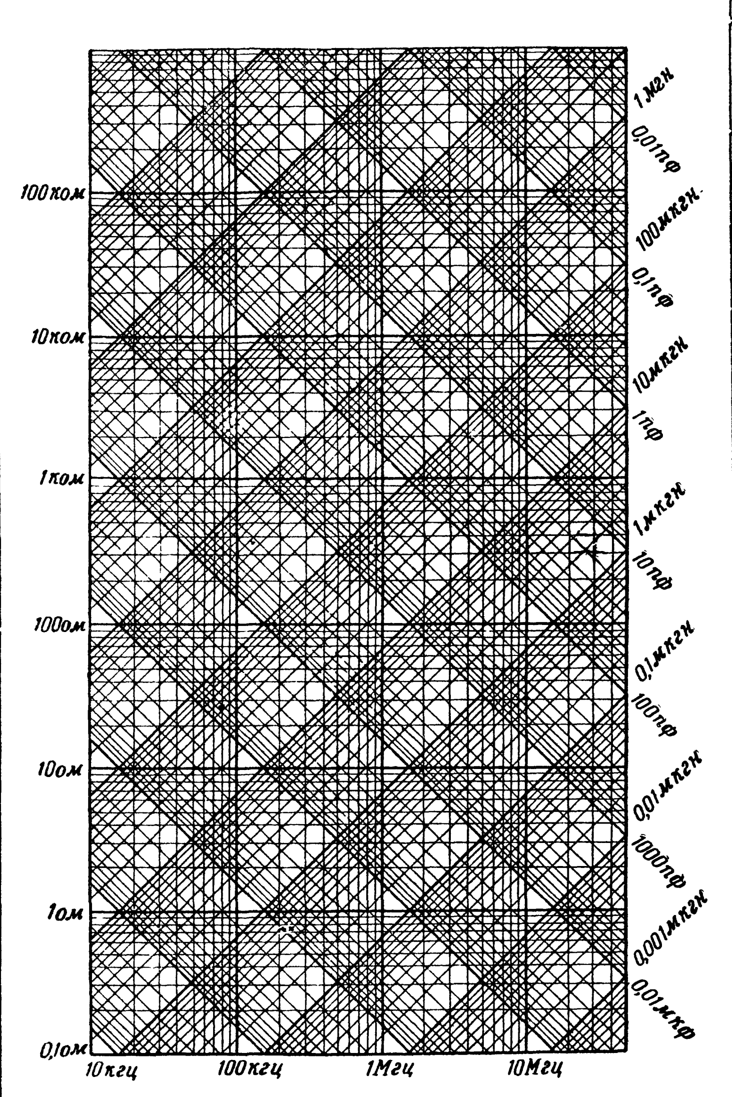


Рис. 39. Номограмма для определения индуктивности катушки резонансного контура и ее реактивного сопротивления.

вого измерения обозначить через L_0, а второго — через L_1, то собственная емкость равна:

$$C_{соб} \approx 25 \frac{L_1 - L_0}{f_1^2 L_1^2}, \qquad (22)$$

где $C_{соб}$ — в пикофарадах, L_1 и L_0 — в микрогенри, а f_1 — в мегагерцах.

При расчетах резонансных контуров бывает необходимо по известной емкости определить требуемую для настройки на заданную частоту индуктивность катушки и ее реактивное сопротивление. При этом можно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 39. Здесь по горизонтальной оси отложены значения частоты, а по вертикальной — реактивного сопротивления. Наклонные линии соответствуют значениям индуктивности и емкости.

Пример. Найти индуктивность L контура, настроенного на частоту 10 *Мгц* при условии, что его емкость равна 50 *пф*. Из номограммы видно, что требуемая индуктивность равна 5 *мкгн*. Реактивное сопротивление катушки будет около 330 *ом*.

ПРИМЕНЕНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Преобразователь напряжения. В описываемой схеме однотактного преобразователя напряжения на полупроводниковых приборах (рис. 40) невысокая стабильность контура на ферритах не играет значительной роли, так как на первый план выступают малые габариты и простота конструкции.

Трансформатор *Тр* выполнен на кольцевом сердечнике с начальной проницаемостью $\mu_н = 2\,000 \div 3\,000$. Его обмотка образует совместно с конденсатором C_1 и резистором R_1 генератор релаксационных колебаний с частотой 10—15 *кгц*. Полученные на повышающей вторичной обмотке L_3 колебания выпрямляются диодом типа Д7Ж.

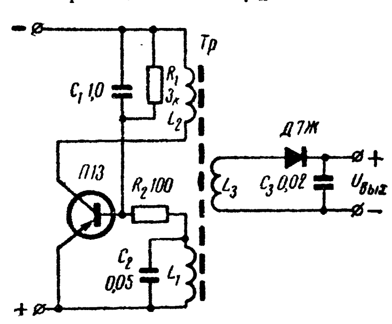


Рис. 40. Схема однотактного преобразователя напряжения.

Подобные устройства способны преобразовывать постоянное напряжение 1—2 *в* до 100 *в* и более при к. п. д. порядка 40—50%. Номиналы отдельных деталей схемы, типы полупроводниковых приборов и размеры сердечника зависят от требуемой мощности, которая может быть получена в пределах от десятка милливатт до нескольких ватт. Соответственно выбирают сердечник с внешним диаметром от 10 до 50 *мм*. Обмотка L_2 составляет 20—30 витков, L_1—5—8 витков, а L_3— до сотни витков в зависимости от требуемого напряжения.

Двухтактный преобразователь напряжения более устойчив в работе, прост в наладке и имеет меньшую величину пульсации выход-

ного напряжения. На рис. 41 приведена принципиальная схема двухтактного преобразователя напряжения с 12 на 120 *в* мощностью 1,5—2 *вт*. Сердечник трансформатора — кольцевой из феррита марки 2000НН, его наружный диаметр 18,5 *мм* и внутренний 10 *мм*. Числа витков обмоток: L_1 — 2×20, L_2 — 2×6 и L_3 — 180; к. п. д. преобразователя 60%.

Трансформаторы преобразователей напряжений могут быть намотаны также и на Ш-образных сердечниках.

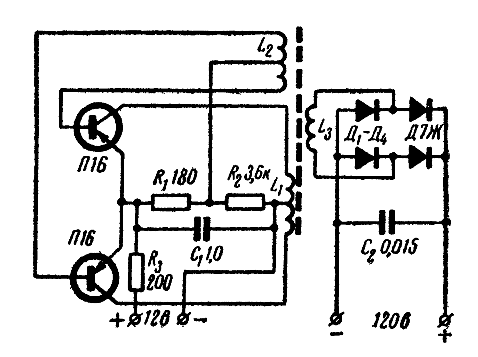


Рис. 41. Схема двухтактного преобразователя напряжения.

Описанные преобразователи напряжения применяют в автомобильных, портативных ламповых приемниках и в переносных радиостанциях, питаемых от низковольтных источников постоянного напряжения.

Простейшие фильтры на ферритах. В счетных и переключающих устройствах часто необходимо принимать меры по исключению взаимных влияний (помех), паразитных наводок и др. Взаимные помехи возникают, в частности, вследствие работы различных узлов электронного устройства от общего источника питания. Целесообразным способом предотвращения взаимных помех является установка развязывающих (заградительных) фильтров в проводах, питающих тот или иной функциональный узел. Наиболее просто изготовление такого фильтра с применением кольцевых ферритовых сердечников. Для развязки цепей от импульсных помех с частотами следования ниже 100 *кгц* достаточно включить последовательно в цепь питания дроссель из 30—50 витков, намотанный на кольцевом ферритовом сердечнике внешним диаметром 7—12 *мм* из материала 1000НН с зазором до 1 *мм*, а параллельно источнику питания — электролитический конденсатор емкостью 20—30 *мкф*.

Антенные трансформаторы. Назначением антенных трансформаторов является сопряжение элементов антенной цепи и обеспечение перехода от симметричных антенн к несимметричному входу приемника.

Особые трудности возникают при изготовлении трансформаторов на частоты коротковолнового и ультракоротковолнового диапазонов, где паразитные емкости частей обмотки нарушают симметрию антен-

ны, что вызывает появление антенного эффекта, неопределенности нуля диаграммы и др.

Воздушный трансформатор без сердечника из-за большой индуктивности рассеяния перекрывает весьма малый частотный диапазон. Лучше в этом отношении антенный трансформатор с обмотками на ферритовом кольце, еще лучше трансформатор с индуктивным шлейфом (рис. 42). Последнему свойственна высокая симметрия, так как емкостная связь между его обмотками сведена до минимума.

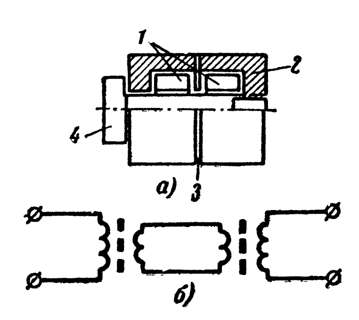


Рис. 42. Конструкция антенного трансформатора с индуктивным шлейфом (*а*) и его эквивалентная схема (*б*)

1 — ферритовые торы; *2* — корпус; *3* — экран; *4* — стяжной болт.

Как видно из эквивалентной схемы трансформатора с индуктивным шлейфом (рис. 42, *б*), связь между его первичной и вторичной обмотками, расположенными на кольцевых сердечниках из феррита с большой проницательностью (на рис. 42, *а* они обозначены цифрой *1*), осуществляется при помощи объемного витка (индуктивного шлейфа), образованного корпусом (экраном) трансформатора *2* (*3*) и центральным стержнем — болтом *4*, стягивающим всю конструкцию.

Экспериментальное исследование различных конструкций показало, что конструкция с индуктивным шлейфом позволяет значительно улучшить параметры антенного трансформатора в широком диапазоне частот.

Применение ферритовых кольцевых сердечников с большой проницаемостью, особый способ намотки (пучком параллельных проводов, закрывающих бо́льшую часть поверхности колец) и сильная связь между обмотками и объемным витком (достигается особой конструкцией витка-экрана, в основу которой заложено стремление приблизить экран к обмотке) уменьшают рассеяние в трансформаторе с индуктивным шлейфом.

Решающим фактором, обеспечивающим расширение диапазона рабочих частот антенного трансформатора, оказывается правильный выбор магнитного материала сердечников. Работа на участке магнитной характеристики выше граничной частоты, где магнитная проницаемость материала начинает постепенно уменьшаться при увеличении частоты, позволяет расширить рабочий диапазон частот трансформатора, так как в этой области замедляется рост реактивного сопротивления при увеличении частоты. Между тем, в известных до сих пор устройствах это свойство феррита не использовалось, очевидно, вследствие больших потерь, которыми сопровождается переход в эту область частот. Выбирая для антенного трансформатора ферритовый сердечник соответствующий проницаемости и размеров, можно расширить его рабочий диапазон частот.

Наилучшим получается трансформатор, зазор между кольцами и корпусом которого составляет 1—2 *мм*. Для уменьшения емкостной связи между кольцами устанавливается электростатический экран (диск с отверстием) *3* (рис. 42), диаметр которого несколько

больше диаметра стяжного болта. Хорошие результаты в диапазоне частот 30—70 *Мгц* дает трансформатор на кольцах из феррита 600НН с внешним диаметром 11 *мм* и внутренним 6 *мм* при ширине кольца 5 *мм*. Число витков обмоток трансформатора в зависимости от диапазона частот и назначения трансформатора — от 10 до 20. Корпус внешним диаметром 15 *мм* и внутренним 12 *мм* изготовляют из латуни и покрывают серебром. Диаметр стяжного болта 5 *мм*.

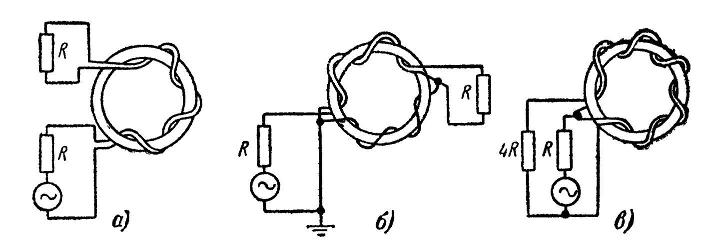


Рис. 43. Схемы трансформаторов, использующих принцип длинной линии.

Коэффициент трансформации описанного трансформатора сохраняет расчетное значение с точностью не хуже 5% во всем диапазоне частот. Следует заметить, что трансформаторы со шлейфом описанной конструкции должны использоваться при условии, что сопротивления на входе и выходе не превышают единиц килоом. В противном случае их показатели резко ухудшаются.

Интересны трансформаторы на ферритах, представляющие собой сочетание длинной линии и идеального трансформатора. Принцип действия такого трансформатора поясняется на рис. 43, *а*. Его обмотки, образующие длинную линию, намотаны бифилярно, что обеспечивает коэффициент передачи, близкой к единице в широком диапазоне частот (от 100 *кгц* до сотен мегагерц). Фаза колебания, поданного на вход трансформатора, может быть повернута на 180° путем выбора точки заземления на выходе. Достоинством такого трансформатора является также независимость его параметров от тока подмагничивания и нестабильности ферритов.

В таких трансформаторах обычно применяют ферритовые сердечники с высокой начальной проницаемостью, что позволяет использовать в диапазоне радиочастот падающий участок частотной характеристики магнитной проницаемости. В этом случае ферритовый сердечник трансформатора является средой, изменяющей параметры длинной линии в сторону улучшения передачи энергии.

Рассмотренные трансформаторы просты в изготовлении и имеют малые размеры. Так, например, симметрирующий трансформатор для диапазона частот 20—100 *Мгц* (рис. 43, *б*) изготавливается на кольцах внешним диаметром 12,5 *мм* из феррита марки 600НН или 400НН. Он состоит из 3—4 витков бифилярной обмотки и такого же количества витков дополнительной обмотки из литцендрата 7×0,1. Расстояние между проводами бифилярной обмотки берется минимальным и строго выдерживается по всей длине обмотки. Подобный

трансформатор обеспечивает коэффициент симметрии[1] от 100 до 15—20 при условии постоянства входного и выходного сопротивлений.

Хорошие результаты дает трансформатор, показанный на рис. 43, *в*. Он состоит из 5 витков бифилярной обмотки, аналогичной обмотке вышеописанного трансформатора. Применяя в этом трансформаторе кольцевые сердечники из феррита 600НН или 1000НН внешним диаметром 7—10 *мм*, удается получить постоянство трансформации сопротивлений (и напряжений) в диапазоне частот 1—50 *Мгц*.

Магнитная антенна для «охоты на лис». «Охота на лис» — вид радиоспорта, в котором удачно сочетаются спортивные качества — выносливость, умение быстро передвигаться по закрытой местности и техническое мастерство радиолюбителя. Целью соревнований является наиболее быстрое отыскание замаскированного маломощного передатчика — «лисы». Естественно, что бóльшие шансы на победу имеет тот, в чьем расположении наиболее чувствительный и компактный приемник с направленной антенной.

Применение для «охоты на лис» в радиолюбительском УКВ диапазоне 144 *Мгц* направленных антенн типа «волновой канал» или с логпериодической структурой неудобно, так как их поперечные линейные размеры порядка одного, а продольные — до двух метров. С такими антеннами затруднено передвижение спортсмена, особенно в лесу или кустарнике. К тому же на определение направления оказывает влияние и положение спортсмена относительно антенны.

Значительно эффективнее применение магнитной антенны, хорошо зарекомендовавшей себя при соревнованиях «Охота на лис» на КВ диапазоне.

В магнитной УКВ антенне (рис. 44) катушка заменена охватывающим стержень *1* из феррита марки 30ВЧ2 объемным витком *2*, который настраивается в резонанс пятью конденсаторами *3—7*, равномерно распределенными по длине щели объемного витка. Размеры сердечника: длина — 80 *мм*, диаметр 8 *мм*.

Объемный виток представляет собой разомкнутый цилиндр из листовой латуни, тонкой жести или фольги с длиной по образующей цилиндра 50 *мм*. Он располагается на сердечнике симметрично так, что длина выступающих концов сердечника составляет около 15 *мм*. Ширина щели 2—3 *мм*. Во избежание перемещения объемного витка его можно приклеить к сердечнику клеем БФ-4 или зажать вместе с сердечником в держатель, изготовленный из хорошего диэлектрика. Вблизи антенны нельзя помещать какие-либо металлические части, которые могут образовывать паразитные контуры.

Конденсаторы припаивают к краям щели. Их выводы не должны превышать 3 *мм*. Лучшими конденсаторами для этой цели являются дисковые. Крайние конденсаторы *3* и *7*, а также один из средних (например, *4*) должны иметь емкость по 6,2 *пф*.

Конденсаторы *5* и *6* соединены последовательно, причем емкость первого 8 *пф* и второго — 20—25 *пф*. Конденсатор *6* является элементом связи антенны со входом приемника — к нему подпаивают про-

---

[1] Коэффициентом симметрии называется отношение напряжений на выходе трансформатора при симметричном и несимметричном включениях одной из обмоток (симметричной).

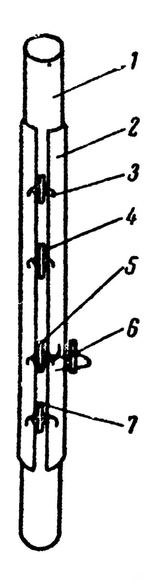


Рис. 44. Магнитная антенна для «охоты на лис» в диапазоне 144 *Мгц*

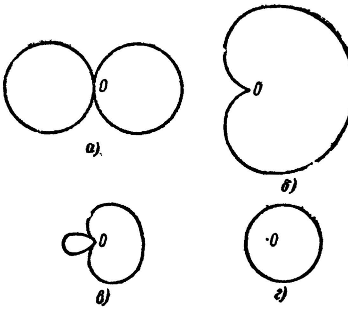


Рис. 45. Диаграммы направленности магнитной антенны на диапазон 144 *Мгц*.

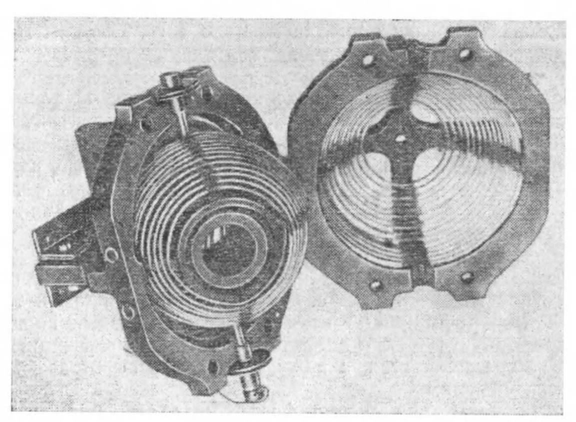


Рис. 46. Внешний вид антенного вариометра с ферритовыми сердечниками.

вода, идущие к базе и эмиттеру транзистора входного каскада. Конденсаторы *5* и *6* располагают друг от друга и от концов объемного витка на расстоянии 10 *мм*. Точная настройка антенны осуществляется перемещением конденсатора *4* вдоль щели; приближая его к составной емкости *5—6*, мы понижаем частоту настройки, отдаляя — повышаем. Добротность антенны — 70—80, «входное сопротивление» — 150—170 *ом*.

Диаграмма направленности магнитной антенны при горизонтальном ее расположении представляет собой восьмерку (рис. 45, *а*) для вертикально поляризованных волн. Однако при приближении ее к телу оператора на расстояние 3—5 *см* диаграмма становится однонаправленной (рис. 45, *б*) вследствие того, что тело играет роль рефлектора.

Изменяя расстояние между телом оператора и антенной, можно получить диаграммы направленности различных видов (рис. 45, *в*, *г*).

При расположении антенны с приемником на груди оператора максимум диаграммы направленности направлен вперед, что позволяет оператору двигаться по максимуму слышимости.

Действующая высота описанной антенны с учетом влияния тела оператора составляет 0,3—0,4 *м*, что практически достаточно для обнаружения одноваттного передатчика на расстоянии 2,5—3 *км*. Чувствительность приемника при этом должна быть не менее 5—7 *мкв* антенны.

Сердечник антенны можно сделать разъемным. При этом можно будет осуществлять полную настройку антенны, изменяя величину зазора между половинками ферритового сердечника. Изменение зазора должно быть весьма плавным, особенно в области минимальной его величины. Сердечник антенны раскалывается на две половины достаточно легко, если предварительно в намеченном месте сделать надфилем или напильником кольцевую проточку глубиной 0,2—0,3 *мм*.

Вариометр для настройки антенного контура. С точки зрения получения максимальных перекрытий, из числа концентрических вариометров наилучшим является шаровой (рис. 46), применяемый в передатчиках СВ диапазона. Максимальный коэффициент перекрытия получается при равенстве индуктивностей статора и ротора. Однако, как правило, индуктивность роторной катушки меньше, так как геометрические размеры ее меньше, чем статорной.

С введением ферритового сердечника внутрь ротора индуктивность статора увеличивается значительно меньше, чем ротора (из-за наличия зазора между обмоткой статора и сердечником и экранирующего действия роторной обмотки). Поэтому индуктивности роторной и статорной катушек становятся близкими, коэффициент связи между ними увеличивается, а вследствие этого повышается и коэффициент перекрытия.

Таким образом, применение ферритовых сердечников в вариометрах антенных контуров резко повышает их перекрытие и увеличивает максимальное значение индуктивности без существенного ухудшения добротности.

Широкодиапазонная телевизионная антенна. С изменением частоты принимаемых сигналов входное сопротивление обычной антенны также изменяется. Вследствие этого ухудшается передача энергии через фидер, т. е. нарушается согласование антенны с фидером.

Антенна соединяется с телевизором длинным фидером. При отсутствии согласования антенны с фидером, помимо уменьшения уровня сигнала на входе телевизора, на его экране может возникнуть несколько сдвинутых изображений. Обычная антенна с длиной диполя 3 *м*, настроенная на первый сигнал программы, имеет входное сопротивление, близкое к 75 *ом*, и хорошо согласуется с высокочастотным кабелем, волновое сопротивление которого также равно 75 *ом*. При приеме на эту же антенну сигнала второй программы ее входное сопротивление составляет примерно 400—600 *ом* (в зависи-

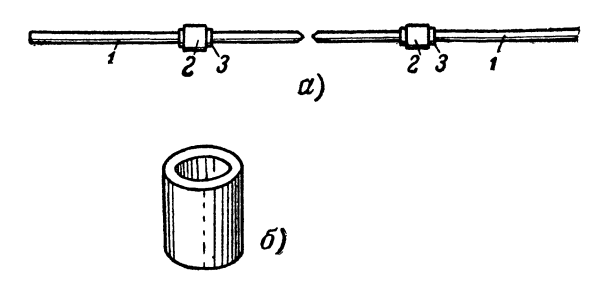


Рис. 47. Схематическая конструкция широкополосной телевизионной антенны (*а*) и компенсирующее ферритовое кольцо (*б*).

мости от диаметра полудиполей), что приводит к нарушению согласования.

Расчеты показывают, что, применяя обычную антенну, трудно получить на крайних частотах диапазона 50—100 *Мгц* коэффициент бегущей волны больше 0,2—0,25.

Надетые на полудиполи *1* антенны ферритовые кольца *2* (рис. 47), резко увеличивая индуктивность полудиполей, позволяют скомпенсировать их емкостное сопротивление и тем самым существенно уменьшить реактивное сопротивление антенны на концах диапазона и выравнять активное сопротивление. Рост с частотой магнитных потерь выравнивает активное сопротивление антенны в диапазоне частот.

Ферритовые кольца укрепляют при помощи резиновых шайб *3*, плотно насаженных на трубки полудиполей.

Расположение колец и их размеры существенно влияют на величину входного сопротивления антенны. В результате экспериментов были выбраны следующие размеры и марка ферритового кольца для антенны на диапазон частот 50—100 *Мгц*: наружный диаметр 28 *мм*, внутренний диаметр 18 *мм*. Высота кольца 25 *мм* при использовании феррита марки 1000НН или 30 *мм* при феррите марки 600НН; длина полудиполя 85 *см*.

В зависимости от требуемой величины активного сопротивления (60, 100 или 150 *ом*) расстояния от концов полудиполей до колец выбирались равными 250, 500 и 700 *мм*. При использовании фидеров с соответствующими волновыми сопротивлениями коэффициент бегущей волны оказался не хуже 0,6—0,65.

Генератор с магнитной перестройкой частоты. Резко выраженная зависимость магнитной проницаемости ферритов от постоянного намагничивающего поля позволяет создавать принципиально новые схемы управления частотой генератора. Наиболее целесообразно подобную настройку применять в схемах автоподстройки и генераторах качающейся частоты. На рис. 48 приведена принципиальная схема системы перестройки частоты гетеродина на растянутых коротковолновых поддиапазонах радиоприемника.

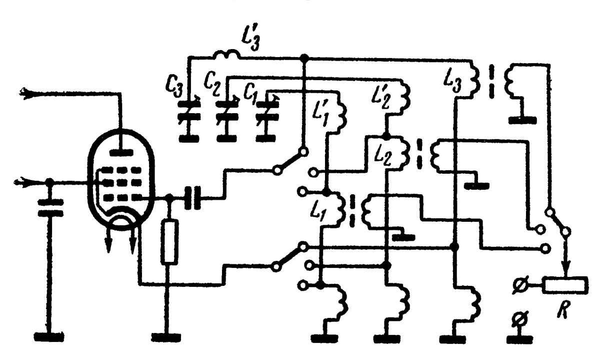


Рис. 48. Схема генератора с магнитной перестройкой частоты.

Применение такой магнитной настройки позволяет избежать усложнения схемы на диапазонах с большим перекрытием частоты. Схема магнитной настройки позволяет относительно просто производить настройку с вынесенного пульта управления.

При магнитной настройке вместо конденсатора переменной емкости в контур гетеродина включается один из конденсаторов C_1 — C_3 емкостью 10—15 *пф* и управление частотой гетеродина производится путем изменения величины постоянного тока в цепи катушек индуктивности L_1 — L_3, которые соединены с основными контурными катушками L'_1—L'_3. Ток подмагничивания регулируется переменным резистором R в пределах 5—250 *ма*.

Индуктивность катушек L_1 — L_3 выбирают обычно равной 30—60% общей индуктивности контура, при этом условии добротность и стабильность контура гетеродина существенно не ухудшаются. Размеры и материал сердечника, а также количество витков катушек выбирают в зависимости от диапазона работы гетеродина. Так, для катушки индуктивности L_1, предназначенной для диапазона волн 25—32 *м*, используют сердечники из феррита 150ВЧ диаметром $d_н =$ $= 22$ *мм*, $d_{вн} = 11$ *мм* и высотой 5,5 *мм*. Для катушек L_2 и L_3 на диапазоны 35—37 *м* и 40—43 *м* соответственно применяются сердечники из того же феррита размерами: $d_н = 20$ *мм*, $d_{вн} = 10$ *мм*, $h =$ $= 5$ *мм*. Индуктивность катушки $L_1 = 4$ *мкгн*, $L_2 = 11$ *мкгн* и $L_3 =$ $= 30$ *мкгн*.

Конструктивно основные катушки индуктивности контуров гетеродина и катушки подмагничивания выполняют так, чтобы исключить взаимную связь между ними. Для этого каждую основную катушку индуктивности гетеродина наматывают на двух кольцевых

сердечниках, причем направления намотки катушек на каждом из них противоположны. Затем обе катушки соединяют параллельно или последовательно (в зависимости от требуемой индуктивности). Так, катушки L_1 и L_2 состоят из двух параллельно включенных обмоток по 10 витков в каждой, а катушка L_3 — из двух последовательно включенных таких же обмоток.

Катушку подмагничивания наматывают на оба сердечника, сложенные вместе. Число витков катушки выбирают в зависимости от мощности источника тока подмагничивания (в соответствии с графиками рис. 13).

В рассматриваемой схеме число витков катушки подмагничивания принималось равным 100, при этом для осуществления необходимого перекрытия поддиапазона ток через катушку изменялся в следующих пределах: от 250 до 50 *ма* для катушки L_1, от 5 до 50 *ма* для катушки L_2 и от 10 до 50 *ма* для катушки L_3.

Электронный переключатель на ферритах. Переключение антенны, входных и других контуров УКВ диапазона обычно производят с помощью массивного многоконтактного барабана, в отсеках которого размещают переключаемые элементы схемы. Так устроены, например, переключатели программ в телевизорах, в секторах барабана которых располагаются контурные катушки и катушки связи.

Недостатком барабанного переключателя, помимо его громоздкости и сложности, является ухудшение контактов с течением времени вследствие истирания и окисления проводящих поверхностей.

Механическое переключение можно заменить электронным, используя полупроводниковые диоды. Однако большое количество параллельных цепей, хотя и «запертых» диодами, создает опасность шунтирования рабочей цепи. С целью преодоления этого недостатка можно использовать короткозамкнутые коаксиальные четвертьволновые шлейфы. Применение в них в качестве электромагнитной среды ферритов в десятки раз сокращает длину шлейфов и увеличивает их широкополосность.

Наружная оболочка коаксиального шлейфа вместе с дном образует «стакан», часто используемый в качестве симметрирующего устройства. Для колебаний частоты $f_0 = 300/4l_{эл}$, где $l_{эл}$ — электрическая длина линии, входное сопротивление такого стакана весьма велико Для диапазона 150—250 *Мгц* (6—12-й каналы телевидения) длина таких шлейфов весьма значительна (от 50 до 30 *см*). Для того чтобы их входное сопротивление оставалось большим, электрическую длину шлейфов необходимо изменять. Все это создает конструктивные затруднения. Выход из этих затруднений может быть найден путем заполнения объема между стенками стакана *1* и средним стержнем *3* шлейфа (рис. 49) ферритовыми шайбами *2* со специально подобранными магнитной и диэлектрической проницаемостью.

Скорость распространения электромагнитной волны зависит от свойств среды. Влияние феррита в шлейфе при неизменной геометрической длине выразится в увеличении его электрической длины в число раз, равное

$$\xi = \sqrt{\mu\varepsilon}, \quad (23)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость феррита.

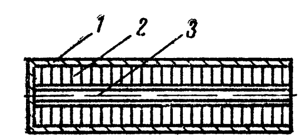


Рис. 49. Разрез ферритового шлейфа для электронного переключателя.

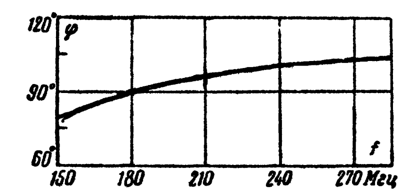


Рис. 50. Зависимость фазового угла ферритового шлейфа от частоты

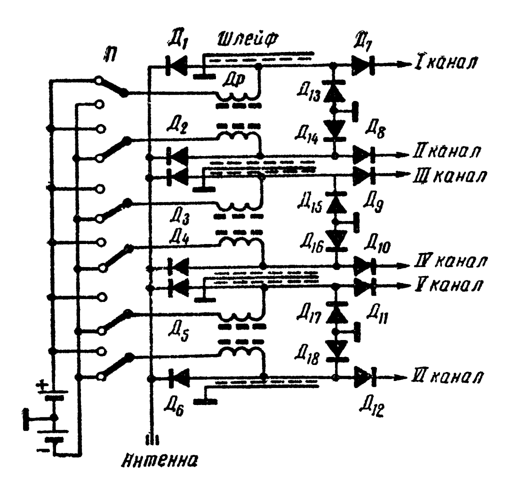


Рис. 51. Принципиальная схема электронного переключателя.

Помимо этого, как уже говорилось ранее, ферриты в некотором диапазоне частот характеризуются падением μ и ε. Такими свойствами в рассматриваемом здесь диапазоне обладают, в частности, феррокспланы. При этом, как это видно из формулы (23), величина ξ, называемая часто *коэффициентом укорочения*, будет падать с ростом частоты и при правильном выборе магнитного материала электрическая длина шлейфа будет достаточно близка к четверти длины волны во всем диапазоне. На рис. 50 показано изменение фазового угла, характеризующего электрическую длину при включении в измерительную линию шлейфа с феррокспланом состава Co_2Zn в диапазоне 150—280 *Мгц*. Как видно из графика, фазовый угол φ при включении шлейфа отличается от 90° (четверть волны) в пределах диапазона всего лишь на ±10°, что обеспечивает высокое входное сопротивление.

Общая схема электронного переключателя на 6 каналов приведена на рис. 51. В него входят, помимо шести ферритовых шлейфов, 12 запирающих полупроводниковых диодов $Д_1$—$Д_2$, шесть диодов $Д_{13}$—$Д_{14}$, замыкающих шлейфы на корпус, цепи постоянного смещения с элементами развязки (*Др*) и двухплатный галетный переключатель (*П*). Задачей последнего является подача соответствующего смещения на диоды, обеспечивающего нормальную работу электронного коммутатора — полное открытие диодов и их запирание. В качестве переключающих диодов могут быть использованы обычные германиевые диоды типа Д9Б.

Проследим работу электронного коммутатора в положении, соответствующем включению первого канала. Положительное напряжение, поступающее с галетного переключателя, откроет диоды $Д_1$ и $Д_7$, запрет диод $Д_{13}$ и таким образом антенна будет соединена со входным контуром первого канала. Со второй платы переключателя на все остальные шлейфы в это же время подается отрицательное напряжение, запирающее диоды $Д_2$ — $Д_6$ и $Д_8$ — $Д_{12}$ других каналов и открывающее диоды $Д_{14}$ — $Д_{18}$, которые замыкают шлейфы накоротко. При этом сопротивление последних резко возрастает и шунтирующее действие неработающих каналов уменьшается до минимума.

В цепях смещения используются высокочастотные дроссели на ферритовых цилиндрических сердечниках диаметром 3 *мм* из материала 600НН. Число витков 10—12.

При расчете конструктивных размеров шлейфов, помимо выбора длины их, определяемой диапазоном рабочих частот и параметрами ферромагнитного заполнителя, следует правильно выбирать и поперечные размеры элементов шлейфа — диаметр жилы и внутренний диаметр оболочки шлейфа, с тем чтобы волновое сопротивление шлейфа совпадало с волновым сопротивлением кабеля.

Измерения электронного переключателя показали, что затухание в переключателе не превышает одного децибела. На этом же принципе можно сконструировать и быстродействующий электронный коммутатор, если вместо постоянных напряжений подавать прямоугольные переключающие импульсы.

---

1. Параметры металлических ферромагнетиков

Параметр	Материал				
	Сталь магнитно-мягкая	Сталь электротехническая	Пермаллой 45Н	Пермаллой 68Н	Пермаллой 79НМ
Начальная проницаемость	120	500	2 500	1 200	100 000
Максимальная проницаемость	2 000	7 000	25 000	250 000	1 000 000
Коэрцитивная сила, *а/м*	144	40	12	1,2	0,03
Индукция насыщения, *тл*	2,1	1,97	1,6	1,3	0,79
Электрическое сопротивление, *мком·см*	10	60	45	20	60
Точка Кюри, °С	770	690	—	600	400
Плотность, *г/см*^{3}	7,8	7,65	8,17	8,45	8,77

2. Параметры магнитодиэлектриков

Параметр	Материал				
	Карбонильное железо Р-4	Карбонильное железо П-4	Альсифер ВЧ-32	Альсифер ВЧК-22	Пермаллой „Пресс-сперм"
Начальная магнитная проницаемость	12	13	30	22	20
Граничная частота, *Мгц*	5	0,5	0,5	1,5	0,15
Температурный коэффициент магнитной проницаемости $\times 10^{-6}$	180	220	—250	—50	—
Коэффициент потерь на гистерезис $\times 10^{-3}$	0,16	0,11	2	1	1
Коэффициент потерь на вихревые токи $\times 10^{-9}$	2	2,5	85	12	15
Коэффициент потерь на последействие $\times 10^{-3}$	30	40	1	1,2	1

Примечание. Значения коэффициентов потерь даны для $H \leqslant 80$ *а/м*.

Цена 16 коп.